

Trabajo de Fin de Grado

Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales

Optimización económica de un sistema doméstico de generación y almacenamiento de energía

MEMORIA

Autor: Victor de Regás Peña
Director: Jordi Olivella
Convocatoria: Julio 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



RESUMEN

Este proyecto consiste en el estudio de la viabilidad económica de las instalaciones fotovoltaicas domésticas de autoconsumo en Barcelona. Es decir, en este proyecto se estudiará la rentabilidad de instalar, en una vivienda unifamiliar de Barcelona, una instalación de paneles solares fotovoltaicos. Estos paneles utilizarán la radiación solar para generar energía que será consumida por la propia vivienda reduciendo así la energía consumida de la red eléctrica.

El estudio de rentabilidad se aplicará sobre 6 consumos domésticos distintos. Es decir, se analizará la rentabilidad de instalar una instalación fotovoltaica en función del consumo de la vivienda (estos consumos serán reales ya que serán extraídos de viviendas existentes). De esta manera, se podrán sacar conclusiones más transversales y no tan concretas (como si solo tuviéramos en cuenta un consumo en particular) sobre la rentabilidad de instalaciones fotovoltaicas domésticas.

Para agilizar y automatizar el análisis de rentabilidad se ha creado un programa de simulación. Este programa simula la producción de energía de una instalación fotovoltaica doméstica y, a partir de los resultados obtenidos además de tener en cuenta otros aspectos como el consumo de la vivienda, nos indica la rentabilidad de dicha instalación.

Previamente a la construcción del programa, pero, se ha estudiado la normativa vigente sobre instalaciones de autoconsumo, se han comparado las tarifas eléctricas del mercado y se ha analizado el precio de los distintos componentes que forman parte de una instalación fotovoltaica, además de otros aspectos.

Sumario

RESUMEN	2
SUMARIO	3
GLOSARIO	7
1. PREFACIO	8
1.1. Motivación	8
2. INTRODUCCIÓN	9
2.1. Objetivos del proyecto	9
2.2. Alcance del proyecto	9
2.3. Estructura del proyecto	10
3. DESCRIPCIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO	12
3.1. Consumo	12
3.1.1. Consumos seleccionados	12
3.2. Radiación solar	14
3.2.1. Componentes de la radiación solar: directa, difusa y reflejada	14
3.2.2. Irradiación solar	15
3.2.3. Posición relativa Sol-Placa fotovoltaica	15
3.2.4. Radiación solar seleccionada	16
3.2.4.1. Posicionamiento de los paneles	16
3.2.4.2. Obtención de los datos de radiación solar	17
3.3. Normativa	20
3.3.1. Normativa aplicable	22
3.4. Tarifa eléctrica	23
3.4.1. Conceptos previos	23
3.4.1.1. Modalidades de tarifas eléctricas	23
3.4.1.2. Tipos de tarifas eléctricas según el peaje de acceso	24
3.4.1.3. Potencia contratada	25
3.4.2. Descripción de la factura eléctrica	25
3.4.3. Tarifa eléctrica seleccionada	27
4. DESCRIPCIÓN DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA DOMÉSTICA	29
4.1. Paneles fotovoltaicos	30
4.1.1. Tipos de paneles	30
4.1.2. Panel fotovoltaico para el hogar	32
4.1.3. Características eléctricas de los paneles	32
4.1.4. Cálculo de la producción energética de un panel	33
4.1.5. Dimensionado de la instalación	35

4.1.6.	Conexionado de los paneles.....	35
4.2.	Estructura de soporte del panel.....	36
4.3.	Inversor.....	36
4.3.1.	Características eléctricas del inversor.....	36
4.3.2.	Pasos a seguir para determinar el inversor adecuado.....	37
4.4.	Contador de generación.....	37
4.5.	Cableado.....	37
4.6.	Protecciones.....	38
4.7.	Conexión a red.....	38
4.8.	Puesta a tierra.....	38
5.	PROGRAMA DE SIMULACIÓN DE RENTABILIDAD	39
5.1.	Simulación de la producción de energía y del consumo de una instalación fotovoltaica	39
5.2.	Simulación de la rentabilidad de una instalación fotovoltaica	44
5.2.1.	Ahorro económico.....	44
5.2.1.1.	Reducción del rendimiento de los equipos.....	45
5.2.1.2.	Evolución del €/kWh en España.....	46
5.2.2.	Gastos de inversión	48
5.2.2.1.	Paneles fotovoltaicos	48
5.2.2.2.	Estructura de los paneles.....	49
5.2.2.3.	Inversor	50
5.2.2.4.	Contador de generación.....	51
5.2.2.5.	Instalación	51
5.2.3.	Coste de mantenimiento	51
5.2.4.	Otros costes o ingresos a considerar.....	52
5.2.5.	Descripción del funcionamiento del programa de simulación de rentabilidad	53
6.	ANÁLISIS DE RENTABILIDAD	56
6.1.	Caso A.....	56
6.1.1.	Balance energético	57
6.1.2.	Estudio de rentabilidad.....	58
6.1.3.	Impacto medioambiental	61
6.2.	Caso B.....	62
6.3.	Caso C.....	64
6.4.	Caso D.....	65
6.5.	Caso E.....	67
6.6.	Caso F.....	68
6.7.	Comparación entre casos	69
7.	CONCLUSIONES	73

REFERENCIAS	75
Referencias bibliográficas	75
Referencias complementarias	75
ANEXO	77

Glosario

POTENCIA (ELÉCTRICA): es la transferencia de energía eléctrica por unidad de tiempo. Su unidad según el Sistema Internacional es el vatio [W] siendo $1000W = 1kW$.

POTENCIA CONTRATADA: es la potencia máxima [kW] que una vivienda puede exigir a la red eléctrica de forma simultánea.

POTENCIA INSTALADA: es la potencia [kW] de la instalación fotovoltaica instalada en la vivienda.

DIMENSIONADO DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA: es el número de paneles solares de una instalación fotovoltaica (que sería equivalente a hablar de potencia instalada ya que cada panel tiene asociada una potencia).

TARIFA ELÉCTRICA: es la tarifa de luz que se contrata en una vivienda para poder hacer uso de la electricidad de la red eléctrica.

INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA AISLADA: instalación fotovoltaica que no se encuentra conectada a la red eléctrica y que, por lo tanto, no puede consumir energía de la red eléctrica.

INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA CONECTADA A RED: instalación fotovoltaica que se encuentra conectada a la red eléctrica y que, por lo tanto, puede consumir energía tanto de la propia instalación como de la red eléctrica.

INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA CONECTADA A RED CON INYECCIÓN 0: hace referencia a las instalaciones fotovoltaicas conectadas a red que tienen un dispositivo que no permite verter a la red eléctrica la energía excedente generada por la propia instalación.

1. Prefacio

Las energías renovables son fuentes de energía limpias, inagotables y crecientemente competitivas. Se diferencian de las energías no renovables convencionales principalmente por su diversidad, abundancia, potencial de aprovechamiento en cualquier parte del planeta y, sobre todo, porque no producen gases de efecto invernadero ni emisiones contaminantes.

Según las estadísticas aportadas en los últimos años por la Agencia Internacional de la Energía (AIE), el crecimiento de estas energías por todo el mundo es imparable, cosa que muestra que son tanto el presente como el futuro de nuestro planeta.

Actualmente, las principales energías renovables a gran escala son la hidráulica, la eólica y la solar. Si nos centramos en el campo de la generación de energía doméstica para el autoconsumo, la energía solar fotovoltaica es la que lleva la delantera.

En España es cierto que una parte importante de la energía que se produce proviene de las renovables. Ahora bien, si nos centramos en el sector doméstico, esto no ocurre de la misma manera. Sorprende que siendo uno de los países con mayor radiación solar de Europa, sean muy pocas las viviendas que cuenten con sistemas de autoconsumo de energía solar fotovoltaica. Los principales motivos de esta incongruencia han sido las medidas que ha ido tomando el gobierno (que no han favorecido a su desarrollo sino todo lo contrario) y los altos costes de inversión que hacen que en muchos casos este tipo de instalaciones no sean rentables. Dicho esto, pero, estos costes de inversión están evolucionando a la baja de forma significativa y sostenida en los últimos años. Y si a esto le sumamos un probable, no solo relajamiento de la normativa, sino apuesta por las energías renovables con la entrada del nuevo gobierno español, hacen presagiar que se acercan buenos tiempos para las energías renovables en España.

1.1. Motivación

Uno de los principales motivos que hicieron decantarme por este proyecto fue el hecho de ser consciente de la gran importancia que están teniendo y que van a tener las energías renovables en todo el mundo. Realmente creo, al igual que muchos otros, que son sin duda el futuro del planeta y creo firmemente en que hay que apostar por ellas ya desde un primer momento ya que van a ser claves e imprescindibles para combatir el cambio climático y limitar sus efectos más devastadores. Por otro lado, el hecho de poder sumergirme en este mundo y hacerlo con un tema concreto, acotado y cercano como es la rentabilidad del autoconsumo doméstico fotovoltaico, hizo que la balanza se inclinara aún más por este proyecto.

2. Introducció

2.1. Objectivos del proyecto

El objetivo del proyecto es estudiar la rentabilidad de las instalaciones fotovoltaicas domésticas en Barcelona en función del consumo y optimizar el sistema de generación en busca del dimensionado (número de paneles) más óptimo.

Para realizar esta optimización, se analizará la rentabilidad de cada uno de los distintos dimensionados (número de paneles) posibles que pueda tener la instalación y se determinará cuál de ellos es el más rentable. Y esto, para cada uno de los 6 perfiles de consumo seleccionados (6 casos). De esta manera, se tratará de encontrar el equilibrio óptimo entre el consumo de la vivienda y el número de paneles necesarios.

Por otro lado, otro objetivo del proyecto será agilizar y automatizar el estudio de rentabilidad y esto se hará mediante la creación de un programa de simulación.

Finalmente, también será objetivo poder sacar conclusiones lo más transversales posible sobre la rentabilidad de instalaciones fotovoltaicas domésticas y así poder extrapolar los resultados obtenidos a cualquier tipo de vivienda de Barcelona. Por ese motivo, se estudiarán 6 perfiles de consumo distintos (6 casos).

2.2. Alcance del proyecto

El proyecto se centrará en el estudio de la rentabilidad económica y no pretende adentrarse en aspectos técnicos sobre el sistema eléctrico de la instalación.

Por otro lado, el proyecto se focalizará en instalaciones de autoconsumo conectadas a red (y no aisladas) de menos de 10kW de potencia instalada y no tendrá en cuenta la inclusión de un sistema de almacenamiento (baterías).

2.3. Estructura del proyecto

En primer lugar, se definirá el objeto de estudio (es decir, se mostrarán los 6 perfiles de consumo seleccionados, la radiación solar incidente, la normativa aplicable, etc.). A continuación, se detallarán los componentes de una instalación fotovoltaica doméstica. Luego, se procederá a explicar el programa de simulación de rentabilidad que se ha creado. Seguidamente, se realizará el análisis de rentabilidad (usando el programa creado) para cada uno de los 6 perfiles de consumo (6 casos) seleccionados y, finalmente, se extraerán las conclusiones.

Descripción del objeto de estudio

Para estudiar la rentabilidad de una instalación fotovoltaica doméstica no basta con conocer el consumo de energía de una vivienda, sino que es necesario saber también la radiación solar que incide sobre la vivienda, la normativa aplicable y la tarifa eléctrica que se tiene contratada para poder calcular el ahorro económico. A continuación, se expone de forma esquemática estos aspectos que se explicarán con mayor detalle en el apartado 4. *Descripción del objeto de estudio.*

Consumo

Los 6 perfiles de consumo seleccionados son reales ya que están extraídos de viviendas existentes. Se ha tratado de que sean consumos diferentes en volumen y que se produzcan a distintas horas del día.

Radiación solar

Para conocer la energía que genera una instalación fotovoltaica hay que conocer primero la radiación solar incidente.

Se considerará una misma radiación solar para los 6 casos (6 perfiles). Esta decisión se ha tomado de esta manera ya que el objeto de estudio no es la rentabilidad en función de la radiación solar sino la rentabilidad en función del consumo. Por este motivo, se tratará de obtener una radiación solar media de Barcelona (ni muy favorable ni muy desfavorable). De esta manera, se cumplirá con uno de los objetivos del proyecto que es poder extraer conclusiones lo más transversales posible.

Normativa

Para saber los pagos, impuestos y prohibiciones que se aplican sobre las instalaciones de autoconsumo domésticas es imprescindible conocer la normativa vigente. La ley que regula este tipo de instalaciones es el Real Decreto de Autoconsumo 900/2015. Este decreto regula cualquier tipo de instalación de autoconsumo. Nosotros nos centraremos en la parte del Real Decreto que regula las

instalaciones de autoconsumo de menos de 10kW y sin sistema de almacenamiento, por lo que podemos decir que el reglamento aplicable será el mismo para los 6 casos.

Tarifa eléctrica

La tarifa eléctrica determina el precio al que se cobra el kWh cuando se consume energía de la red. Por lo tanto, indirectamente, la tarifa eléctrica determina el beneficio que obtendremos por dejar de consumir parte de la energía de la red para pasar a consumirla de la propia instalación fotovoltaica. Como se explicará más adelante, hay muchos tipos diferentes de tarifas eléctricas en el mercado actual. Ahora bien, siguiendo el objetivo que se ha fijado de estudiar la rentabilidad en función del consumo y de poder extraer conclusiones lo más transversales posible, a cada uno de los 6 casos se les aplicará la misma tarifa y se tratará que dicha tarifa sea la más estándar del mercado con un precio medio de mercado.

Otras restricciones

No se ha puesto restricciones en el espacio disponible para la localización de los paneles ya que el objeto de estudio es la rentabilidad en función del consumo independientemente del espacio que se pueda tener o no para la colocación de dichos paneles.

Cada uno de estos aspectos se encuentra explicado con detalle en el siguiente apartado 4. *Descripción del objeto de estudio.*

Descripción de una instalación fotovoltaica doméstica

En este apartado se detallarán tanto las características principales como la función de cada uno de los componentes de una instalación fotovoltaica doméstica.

Programa de simulación de rentabilidad

Una vez definido el objeto de estudio y conocidos los componentes de la instalación fotovoltaica, se procederá a explicar cómo se ha construido el programa de simulación que nos permitirá agilizar los posteriores análisis de rentabilidad de los 6 casos considerados.

Análisis de rentabilidad

Finalmente se realizarán (usando el programa creado) los estudios de rentabilidad de los 6 casos y se extraerán las conclusiones finales sobre la rentabilidad de las instalaciones fotovoltaicas domésticas en Barcelona.

3. Descripción del objeto de estudio

3.1. Consumo

El consumo eléctrico de una vivienda se mide en kWh. Son muchos los aparatos que consumen electricidad en una vivienda. La lavadora, el frigorífico o incluso el aire acondicionado son un ejemplo. Si queremos saber lo que ha consumido un aparato en particular durante un cierto periodo de tiempo(kWh), basta con multiplicar la potencia del aparato (kW) por el número de horas (h) que ha estado en funcionamiento. Por ejemplo, si el frigorífico tiene una potencia de 200kW y queremos saber lo que ha consumido en 2 horas: $200\text{kW} \cdot 2\text{h} = 400\text{kWh}$.

3.1.1. Consumos seleccionados

Para poder hacer un estudio de rentabilidad fiable y con precisión se ha requerido que los 6 consumos de energía seleccionados estén detallados por horas y durante los 365 días de un año natural. De este modo, se podrá calcular para cada hora del día que cantidad de energía es proporcionada por la red y qué cantidad por la instalación fotovoltaica.

Años atrás, era muy difícil conseguir un consumo de una vivienda detallado por horas dado que los contadores de consumo tradicionales no eran capaces de medir el consumo realizado a cada hora. Desde la entrada en vigor de las tarifas con discriminación horaria (esto es, aplicar el coste de la energía según el momento del día en que es consumida) fue necesario contar con un contador capaz de medir el consumo a cada hora (contador inteligente). En España los contadores inteligentes empezaron a instalarse en 2010. Hoy en día, son muchas las viviendas que cuentan con este tipo de contadores.

Por otro lado, las compañías no suelen enviar el consumo detallado por horas en la factura eléctrica. En general, las compañías ponen a disposición de sus clientes este consumo detallado en su página web o app. De este modo, aquellas viviendas que cuentan con un contador inteligente pueden consultar su consumo por horas entrando con su usuario en la web o la app de la compañía.

De los 6 perfiles que se han considerado, 5 de ellos pertenecen a casa reales de Barcelona y se han extraído mediante la página web de la compañía y el otro sobrante ha sido obtenido mediante la base de datos de la sociedad estadounidense IEEE Power & Energy Society y pertenece también a una vivienda real, en este caso de Portugal.

Para escoger estos 6 perfiles de consumo se ha tratado de que la cantidad anual de kWh consumidos por cada uno sea diferente y que este consumo se produzca a distintas horas del día. Además, se ha comprobado que estos consumos no requieran de una potencia contratada superior a 10kW.

	Consumo anual (kWh)	Potencia contratada (kW)
Caso A	7699	9,2
Caso B	7295	9,2
Caso C	5455	8,05
Caso D	5577	6,9
Caso E	3232	5,75
Caso F	3189	5,75

Tabla 1. Perfiles de consumo seleccionados

3.2. Radiación solar

El Sol es la estrella más grande de nuestro sistema solar. Se encuentra en el centro de éste y hace que el resto de planetas, incluida la Tierra, orbiten alrededor suyo. Su temperatura media es de 6000 K (5727 °Celsius) y en su interior tienen lugar una serie de reacciones de fusión nuclear que provocan una liberación de energía. Esta energía liberada se transmite al exterior mediante la denominada radiación solar.

La radiación solar es pues el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. La intensidad de radiación solar sobre una superficie se mide en $[W/m^2]$ y también recibe el nombre de irradiancia solar.

$$Irradiancia = \frac{Potencia}{Superficie} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Ecuación 1. Irradiancia solar

Esta radiación proveniente del Sol no llega íntegra a la superficie de la Tierra ya que a medida que atraviesa la atmósfera, sufre diferentes procesos de absorción y dispersión. Esto se debe principalmente a dos motivos. Por un lado, a los componentes de la atmósfera, como el ozono o el CO₂, y a las partículas sólidas y líquidas en suspensión como aerosoles o vapor de agua. Y, por el otro lado, siendo este motivo el más relevante, a la cobertura de nubes que hacen de obstáculo reduciendo la cantidad de radiación que llega a la Tierra.

La radiación solar en condiciones de cielo despejado (sin nubes) y la atmósfera limpia y seca es un parámetro muy importante ya que proporciona información sobre la radiación máxima disponible en cualquier ubicación.

3.2.1. Componentes de la radiación solar: directa, difusa y reflejada

La radiación solar recibida a nivel del suelo, conocida como radiación global, es la suma de tres componentes.

- **Directa:** Es la que se recibe directamente desde el sol en línea recta, sin que se desvíe en su paso por la atmósfera. Es la mayor y la más importante en las aplicaciones fotovoltaicas.
- **Difusa:** es la que llega a la superficie después de sufrir múltiples desviaciones en su trayectoria al atravesar la atmósfera. La radiación difusa hace que un cuerpo siempre esté recibiendo una cierta cantidad de energía por todas sus partes. Además, esta radiación se vuelve muy relevante, más incluso que la directa, en días cubiertos (nublados) ya que no permiten que los rayos lleguen directamente a la superficie terrestre sin desviarse.
- **Reflejada:** es la que procede del suelo o de los cuerpos situados alrededor de la superficie debido a la reflexión de la radiación incidente en él. También se conoce con

el nombre de radiación de albedo. Es tanto mayor cuanto más claro sea el color de dichos cuerpos.

La irradiación Global es la suma de estos tres componentes y es la radiación total incidente sobre una superficie.

3.2.2. Irradiación solar

La irradiación solar es la intensidad de radiación solar $[W/m^2]$ por unidad de tiempo $[h]$.

$$Irradiación = \frac{Potencia \cdot Tiempo}{Superficie} \quad \left[\frac{Wh}{m^2} \right]$$

Ecuación 2. Irradiación solar

Este es el valor que necesitaremos a la hora de calcular cuanta energía puede producir un panel fotovoltaico durante un determinado tiempo $[h]$. Su valor será distinto para los diferentes meses del año y en las distintas horas del día con lo que no se producirá la misma energía en un día de verano que en un día de invierno o a las 3am que a las 11am de un mismo día.

3.2.3. Posición relativa Sol-Placa fotovoltaica

Para calcular la radiación solar que llega a una superficie inclinada que se encuentra en el Planeta Tierra (placa fotovoltaica), es necesario conocer las relaciones trigonométricas entre la posición del sol y esta superficie.

Para conocer la posición del Sol en cualquier momento con respecto a un punto concreto de la Tierra que se encuentra inmóvil se utilizan dos coordenadas, llamadas altura solar h y azimut solar a .

La altura solar h es el ángulo que forma el rayo de sol (recta que va desde el centro del sol hasta el punto considerado) con el plano horizontal donde se encuentra el punto considerado. El azimut solar a es el ángulo que forma la proyección del rayo de sol sobre el plano horizontal con el meridiano del lugar (línea que va del Polo Norte al Polo Sur).

Por el otro lado, para determinar la posición del panel fotovoltaico es necesario primero conocer sus coordenadas terrestres: latitud ϕ y longitud L . Seguidamente, sólo con el conocimiento de dos valores angulares más, la posición del panel ya queda completamente definida: el azimut del panel γ y la inclinación del panel β . El azimut del panel es la orientación de dicho panel respecto la dirección Sur. La inclinación del panel β es la pendiente que presenta el panel respecto del plano horizontal.

La diferencia entre los valores que determinan la posición del sol y los que determinan la posición del panel es que los del sol son variables en el tiempo para cada instante (tanto el azimut como la altura solar) y, sin embargo, los del panel no lo son (el panel estará fijo en un punto (latitud y longitud) y tendrá, en nuestro caso, una posición fija también (azimut e inclinación fijas)).

- Para instalaciones con funcionamiento más o menos uniforme durante todo el año: la inclinación debe ser 15° mayor que la latitud de la casa.
- Para instalaciones de función prioritaria en invierno: la inclinación debe ser de 20° mayor que la latitud.
- Para instalaciones de función prioritaria en verano: la inclinación debe ser igual a la latitud.

Cabe comentar que existen instalaciones que para maximizar esta capacidad poseen sistemas de seguimiento solar. Es decir, hacen que el panel mire constantemente al Sol desde el orto hasta el ocaso. Este tipo de instalaciones son poco viables para viviendas, pero sí que se pueden ver en grandes plantas industriales.

En este proyecto, dado que el objetivo es realizar un caso lo más transversal posible, se han elegido unos valores de orientación e inclinación medios, es decir, un punto intermedio entre los más óptimos y los menos óptimos.

- Azimut = -30°
- Inclinación: 30°

3.2.4.2. Obtención de los datos de radiación solar

La radiación solar que se busca, al igual que el consumo, debe estar detallada por horas durante 365 días de un año natural.

Uno de los programas más utilizados para la obtención de la radiación solar en un punto del planeta Tierra es el programa PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) [2], perteneciente a la Comisión Europea. Este programa se ha desarrollado a partir de datos de radiación solar estimados a través de satélite.

Este programa, mediante la posición geográfica de las placas (latitud y longitud) y su posicionamiento (azimut e inclinación) calcula la radiación teniendo en cuenta los aspectos anteriormente considerados como, por ejemplo, los componentes de la atmósfera, como el ozono o el CO₂, la cobertura de nubes, las tres componentes de la radiación (directa, difusa y reflejada) o incluso las posibles sombras que pueda generar el relieve terrestre (montañas) sobre las placas. El único factor importante que no tiene en cuenta son las sombras que posibles objetos (como chimeneas o árboles) puedan provocar sobre las placas dependiendo de la hora del día. Este aspecto se tendrá en cuenta más adelante en forma de coeficiente (FS: factor de sombras) en el cálculo de la producción energética de los paneles.

A continuación, se muestra una imagen del programa PVGIS:

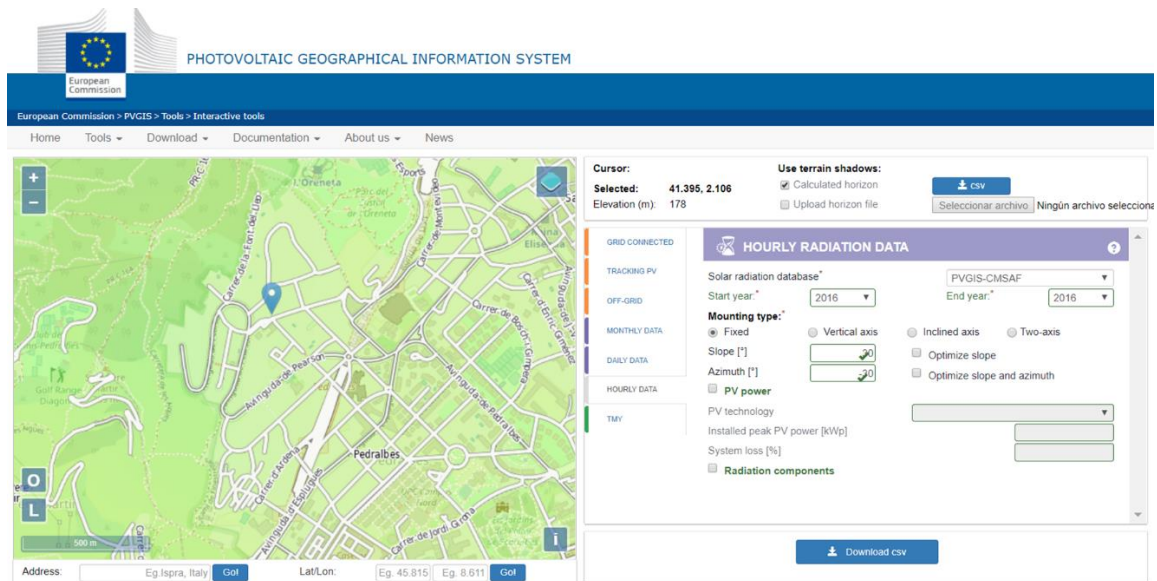


Figura 2. Imagen del programa PVGIS

El año que se ha escogido para los datos ha sido el 2016 dado que es el año más reciente que nos podía proporcionar el programa. Los datos obtenidos se encuentran en formato de hoja de cálculo y se utilizarán posteriormente para el cálculo de la energía generada por los paneles.

1	Latitude (decimal degrees):	41.395	G _i : In-plane irradiance (W/m ²)			
2	Longitude (decimal degrees):	2.106	As: Sun elevation (deg.)			
3	Elevation (m):	178	Tamb: Ambient temperature (deg. C)			
4	Radiation database:	PVGIS-CMSAF	W10: Wind speed (m/s)			
5			int.: 1 means solar radiation values are reconstructed			
6						
7	Slope: 30					
8	Azimuth: -30					
9	Date	G _i	As	Tamb	W10	int.
10	20160101:0055	0.00	0.00	6.23	2.43	0
11	20160101:0155	0.00	0.00	6.20	2.67	0
12	20160101:0255	0.00	0.00	6.17	2.91	0
13	20160101:0355	0.00	0.00	6.14	3.14	0
14	20160101:0455	0.00	0.00	5.84	3.05	0
15	20160101:0555	0.00	0.00	5.53	2.95	0
16	20160101:0655	0.00	0.00	5.22	2.86	0
17	20160101:0755	13.24	5.03	6.33	2.79	0
18	20160101:0855	39.49	13.32	7.44	2.73	0
19	20160101:0955	175.39	19.88	8.54	2.66	0
20	20160101:1055	119.27	24.13	9.68	2.75	0
21	20160101:1155	170.14	25.60	10.82	2.84	0
22	20160101:1255	336.23	24.09	11.96	2.92	0

Figura 3. Datos de radiación obtenidos del programa PVGIS

A continuación, se muestra un gráfico donde se pueden apreciar las horas de mayor y menor radiación solar:

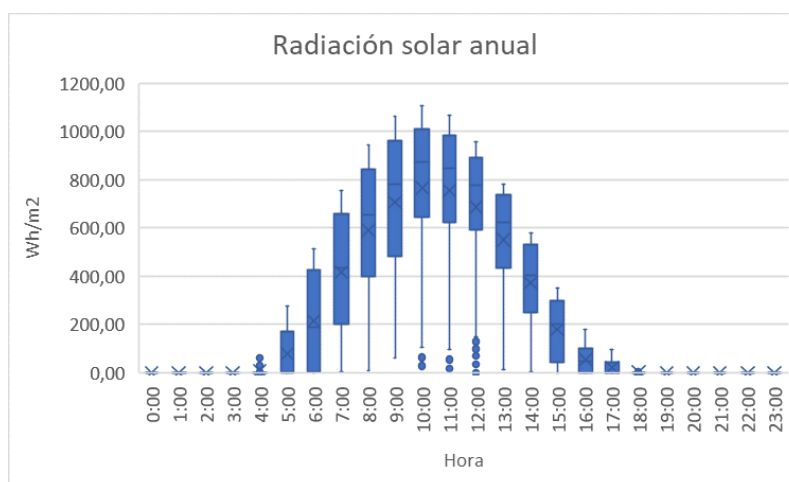


Figura 4. Diagrama de caja de la radiación solar

3.3. Normativa

El 9 de octubre de 2015 se aprobó el Real Decreto de autoconsumo 900/2015 en España [3] por el que se regulan las instalaciones de energía solar fotovoltaica de autoproducción de energía eléctrica. Dentro de este real decreto se explican tanto las instalaciones aisladas como las conectadas a red. Nosotros nos centraremos en las conectadas a red.

Dentro de las instalaciones conectadas a red, el RD 900/2015 distingue dos tipos:

Tipo 1	Tipo 2
Menos de 100kW de potencia instalada	Más de 100kW de potencia instalada
Instalaciones de generación de energía eléctrica destinadas al consumo propio y que no están dadas de alta en el correspondiente registro como instalación de producción.	Instalaciones inscritas en el Registro de Producción del Ministerio como instalación de producción.

A continuación, se muestra una descripción detallada de las instalaciones tipo 1 que son las que nos interesan:

Instalaciones TIPO 1
<p>Son:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Instalaciones destinadas al consumo propio - Potencia contratada inferior a 100kW - No están dadas de alta en el correspondiente registro como instalación de producción
<p>Deben cumplir:</p> <ul style="list-style-type: none"> - La potencia instalada será inferior a la potencia contratada. - El titular del consumo y la producción será el mismo. - Las instalaciones de generación y el punto de suministro deberán cumplir con el Real Decreto 1699/2011 por el que se regula la conexión a la red de las instalaciones de producción de energía eléctrica de pequeña potencia. - Pueden verter los excedentes, pero en ningún caso serán remunerados. - Obligatorio instalar: <ul style="list-style-type: none"> ○ Contador de consumo Ya está instalado de origen por ser el contador que utiliza la empresa eléctrica para facturar. ○ Contador de generación No viene instalado de origen, de modo que su instalación será necesaria

Antes de continuar con la explicación del RD, se va a hacer un breve inciso explicando que se entiende por potencia contratada: la potencia contratada es la potencia máxima que se puede consumir de forma simultánea en una vivienda. Es decir, es la cantidad de kilovatios (kW) que puedes pedirle simultáneamente a la red eléctrica de una casa. Por ejemplo: si se tiene la calefacción eléctrica encendida, la lavadora y el horno, la casa estará exigiendo entre 4 y 6,9 kW aproximadamente. Si se ha contratado menos de 4 kW de potencia, lo más probable es que se apaguen los plomos quedándonos a oscuras hasta que apaguemos unos de los aparatos que teníamos encendidos (la lavadora, el horno o la calefacción) pasando así a exigir a la red menos de 4kW de potencia.

Volviendo al RD, dentro de las instalaciones tipo 1 se hace dos distinciones:

Modalidad 1	Modalidad 2
Instalaciones de menos de 10kW de potencia contratada	Instalaciones de más de 10kW de potencia contratada

A continuación, se muestra una descripción detallada de la modalidad 1 que es la que nos interesa:

<p>Modalidad 1 (menos de 10kW)</p> <p>Se debe realizar una solicitud de nueva conexión eléctrica o modificar la existente a la empresa distribuidora (es decir, es obligado conectar la instalación fotovoltaica a la red eléctrica). Esta solicitud va asociada con el siguiente pago:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pago de estudios de acceso y conexión a red <ul style="list-style-type: none"> o Con inyección 0: exentos o Sin inyección 0: aproximadamente entre 100€ y 200€. De todas formas, las distribuidoras no cobran este pago, pero sí obligan al usuario a pagar una visita de verificación para comprobar que la instalación se ha hecho correctamente que suele costar alrededor de 120€.
<p>Cargo variable: exentos</p> <p>Se aplica sobre la energía producida y autoconsumida. Es la diferencia entre toda la energía producida y los excedentes sobrantes vertidos a la red. Es comúnmente conocido como el impuesto al sol.</p>
<p>Cargo fijo: dependerá de si constan o no de baterías</p> <p>El cargo fijo es un importe anual y se obtiene multiplicando la potencia de cargo fijo (kW) por unos cargos medidos en (€/kW) que aparecen detallados en una tabla en el RD.</p> <p>Dependiendo de si el sistema está dotado de baterías o no, se estará exento de pagar dicho cargo fijo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sin baterías: exentos - Con baterías: no exentos

3.3.1. Normativa aplicable

A continuación, se encuentra resumida la normativa aplicable a nuestro caso de estudio: instalaciones de autoconsumo conectadas a red (sin inyección 0) de menos de 10kW de potencia y sin sistema de almacenamiento (baterías):

- La **potencia instalada** tendrá que ser inferior a la **potencia contratada**.
- **Se podrá verter** a la red eléctrica los excedentes de energía producidos, pero en ningún caso serán remunerados.
- Será obligatorio instalar un **contador de generación**.
- Cargos y pagos:
 - o **Pago de estudios de acceso y conexión a red:** nuestra instalación no estará exenta de este pago ya que no cuenta con inyección cero, aunque las compañías no lo están cobrando.
 - o **Cargo variable:** exentas
 - o **Cargo fijo:** exentas

3.4. Tarifa eléctrica

3.4.1. Conceptos previos

3.4.1.1. Modalidades de tarifas eléctricas

Actualmente, el mercado eléctrico español está dividido en dos mercados distintos (el mercado regulado y el mercado libre) y cada uno de ellos ofrece distintas modalidades de tarifas al consumidor. Estas modalidades son las siguientes:

Mercado regulado

En el mercado regulado, los precios los fija el Gobierno a través de la Red Eléctrica de España. Dentro de este mercado tan solo existe la tarifa llamada PVPC (Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor). Esta tarifa PVPC es una manera de fijar el precio de la luz que fue diseñada por el Gobierno y consiste en que el precio de la luz cambia a cada hora todos los días del año.

En función de si se tiene instalado un contador inteligente o no, el sistema PVPC se aplica de dos formas distintas:

- **Tarifa de luz por horas**

Ya se tiene contador inteligente y, por lo tanto, es posible saber cuántos kWh se consumen cada hora de cada día, por lo que solo hay que aplicar los precios comunicados por Red Eléctrica Española.

- **Precio Medio Ponderado (PMP)**

Aún no se tiene un contador inteligente y, por lo tanto, es imposible saber cuántos kWh se consumen cada hora, por lo que se aplica el perfil de un consumidor promedio (creado por la Red Eléctrica Española).

En este tipo de tarifas PVPC el consumidor no sabe el precio al que va a pagar el kWh hasta que no le llega la factura mensual a casa (tan solo puede consultar los precios que va a haber de un día para otro, es decir, la Red Eléctrica de España publica cada día sobre las 20:15h los 24 precios (1 para cada hora del día) que va haber para el día siguiente).

Mercado libre

En el mercado libre, es la empresa comercializadora quien establece el precio de la luz que crea conveniente para cada una de sus tarifas y es el cliente quien elige la tarifa que más le convenga. Dentro de este mercado, se pueden encontrar tantas tarifas eléctricas como comercializadoras existen, ya que cada comercializadora hace sus ofertas de tarifas y siempre se amplían en busca de nuevas modalidades que se adapten a las necesidades de consumo de los usuarios. Se pueden encontrar tarifas como las de precio fijo, tarifa nocturna, etc.


Lo ventajoso de este mercado es que el consumidor ya sabe antes de contratar la tarifa, a diferencia del mercado regulado, cuánto le va a costar cada kWh que consuma, que será el que ponga en su contrato.

Tanto en el mercado regulado como en el mercado libre se puede contratar las tarifas con o sin discriminación horaria. Las tarifas contratadas con discriminación horaria implican tener 2 o incluso 3 tramos de facturación diferentes según la hora que sea. Cada uno de estos tramos (valle y punta en el caso de tener 2 tramos; valle, punta y supervalle en el caso de tener 3) tienen precios distintos incentivando a trasladar el consumo en los tramos (horas del día) donde el kWh suele ser más barato (valle y, sobre todo, supervalle).


3.4.1.2. Tipos de tarifas eléctricas según el peaje de acceso

Una de las clasificaciones más importantes de las tarifas eléctricas es en función de los peajes de acceso. Los peajes de acceso son una cantidad de dinero que se aplica en la factura eléctrica y es un cargo que las comercializadoras aplican para cubrir los gastos del sistema.

A continuación, se muestra una tabla publicada por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), organismo adscrito al Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, donde se especifican las distintas tarifas que existen para instalaciones de baja tensión (que es la que tenemos en la mayoría de los hogares).



MINISTERIO
DE ENERGÍA, TURISMO
Y AGENDA DIGITAL



IDAE

Nº 33
Año 2018

INFORME DE PRECIOS ENERGÉTICOS REGULADOS

Datos abril de 2018

2.2 PEAJES DE ACCESO A BAJA TENSIÓN (< 1 kV)

(Valores de aplicación a partir del 1/01/2018)

	SIN DISCRIMINACIÓN				CON DISCRIMINACIÓN				CON DISCRIMINACIÓN SUPERVALLE			
	TARIFA 2.0A				TARIFA 2.0DHA				TARIFA 2.0DHS			
	TPA €/kW y año	Δ (*)	TEA €/kWh	Δ (*)	TPA €/kW y año	Δ (*)	TEA €/kWh	Δ (*)	TPA €/kW y año	Δ (*)	TEA €/kWh	Δ (*)
Potencia ≤ 10 kW	38,043426	0,00%	0,044027	0,00%	38,043426	0,00%	P1: 0,062012 P2: 0,002215	P1: 0,0% P2: 0,0%	38,043426	0,00%	P1: 0,062012 P2: 0,002879 P3: 0,000886	P1: 0,0% P2: 0,0% P3: 0,0%

	SIN DISCRIMINACIÓN				CON DISCRIMINACIÓN				CON DISCRIMINACIÓN SUPERVALLE			
	TARIFA 2.1A				TARIFA 2.1DHA				TARIFA 2.1DHS			
	TP €/kW y año	Δ (*)	TE €/kWh	Δ %	TP €/kW y año	Δ (*)	TEA €/kWh	Δ (*)	TP €/kW y año	Δ (*)	TEA €/kWh	Δ (*)
Potencia > 10 kW ≤ 15 kW	44,444710	0,00%	0,05736	0,00%	44,444710	0,00%	P1: 0,074568 P2: 0,013192	P1: 0,0% P2: 0,0%	44,444710	0,00%	P1: 0,074568 P2: 0,017809 P3: 0,006596	P1: 0,0% P2: 0,0% P3: 0,0%

	CON DISCRIMINACIÓN			
	TARIFA 3.0A			
	TP €/kW y año	Δ (*)	TE €/kWh	Δ (*)
Potencia > 15 kW	P1: 40,728885 P2: 24,437330 P3: 16,291555	P1: 0,0% P2: 0,0% P3: 0,0%	P1: 0,018762 P2: 0,012575 P3: 0,004670	P1: 0,0% P2: 0,0% P3: 0,0%

NOTA: En 2018 se mantienen los peajes de acceso establecidos en la Orden IET/107/2014, de 31 de enero.

(*) Variación con respecto a peajes anteriores: BOE nº 314; 29 de diciembre de 2016.

Fuente: BOE nº 314; 27 de diciembre de 2017.

Figura 5. Tabla de peajes de acceso a baja tensión

Concretamente, se ha enmarcado en azul las tarifas referentes a una potencia contratada de menos de 10kW (que es la que nos interesa). Las 3 tarifas son las siguientes:

- **Tarifa 2.0 A:** Tarifa simple
- **Tarifa 2.0 DHA:** Tarifa simple con dos periodos de discriminación horaria
- **Tarifa 2.0 DHS:** Tarifa simple con discriminación supervalle (que son tres periodos de discriminación horaria)

Cada tarifa tiene asociados unos costes (peaje de acceso) que se han subrayado en azul en la imagen. Dichos costes se detallarán más adelante en el apartado 6.2 Factura eléctrica.

3.4.1.3. Potencia contratada

Cuando escogemos una tarifa, aparte de elegir que modalidad de tarifa queremos y si la queremos con o sin discriminación horaria, se tiene que escoger la potencia contratada.

Las potencias contratadas están reguladas por el Ministerio de Industria y a continuación se muestra la tabla publicada en el Boletín Oficial del Estado n.º 74 de 28 de marzo de 2006, por la que se establecen las potencias normalizadas para todos los suministros en baja tensión. Concretamente, debemos fijarnos en los valores para red monofásica (como son la mayoría de las viviendas) a tensión de 230V.

Tabla de potencias activas normalizadas								
Intensidad (A)	Potencias normalizadas (kW)							
	Monofásicos				Trifásicos			
	U=127 V	U=133 V	U=220 V	U=230 V	3x127/220 V	3x133/230 V	3x220/380 V	3x230/400 V
1,5	0,191	0,200	0,330	0,345	0,572	0,598	0,987	1,039
3	0,381	0,399	0,660	0,690	1,143	1,195	1,975	2,078
3,5	0,445	0,466	0,770	0,805	1,334	1,394	2,304	2,425
5	0,635	0,665	1,100	1,150	1,905	1,992	3,291	3,464
7,5	0,953	0,998	1,650	1,725	2,858	2,988	4,936	5,196
10	1,270	1,330	2,200	2,300	3,811	3,984	6,582	6,928
15	1,905	1,995	3,300	3,450	5,716	5,976	9,873	10,392
20	2,540	2,660	4,400	4,600	7,621	7,967	13,164	13,856
25	3,175	3,325	5,500	5,750	9,526	9,959	16,454	17,321
30	3,810	3,990	6,600	6,900	11,432	11,951	19,745	20,785
35	4,445	4,655	7,700	8,050	13,337	13,943	23,036	24,249
40	5,080	5,320	8,800	9,200	15,242	15,935	26,327	27,713
45	5,715	5,985	9,900	10,350	17,147	17,927	29,618	31,177
50	6,350	6,650	11,000	11,500	19,053	19,919	32,909	34,641
63	8,001	8,379	13,860	14,490	24,006	25,097	41,465	43,648

Madrid, 8 de septiembre de 2006.-El Director General de Política Energética y Minas, Jorge Sanz Oliva.

Figura 6. Tabla de potencias contratadas

3.4.2. Descripción de la factura eléctrica

Para poder saber que ahorro económico implica una instalación fotovoltaica en la factura de la luz hay que saber cómo se estructura esta y que componentes son los que nos evitaríamos pagar en caso de tener esta instalación. A continuación, se va a proceder a analizar dicha factura.

Toda factura eléctrica, sea cual sea la tarifa contratada, está estructurada en tres grandes bloques:

DETALLE DE LA FACTURA			
1	Facturación por potencia contratada: Comprende dos conceptos: la facturación por peaje de acceso (resultado de multiplicar los kW contratados por el precio del término de potencia del peaje de acceso y el número de días del periodo de facturación) y la facturación por margen de comercialización fijo.		
	Importe por peaje de acceso: 6,6 kW x 38,043426 Eur/kW y año x (28/365) días	19,26 €	
	Importe del término fijo de los costes de comercialización: 6,6 kW x 3,113 Eur/kW y año x (28/365) días	1,58 €	
			20,84 €
2	Facturación por energía consumida: Comprende dos conceptos: la facturación por peaje de acceso (resultado de multiplicar los kWh consumidos en el periodo de facturación por el precio del término de energía del peaje de acceso) y la facturación por coste de la energía (resultado de multiplicar los kWh consumidos por el precio del término del coste horario de energía del PVPC).		
	Importe por peaje de acceso: 257 kWh x 0,044027 Eur/kWh	11,31 €	
	Importe por coste de la energía (*): 257 kWh x 0,072 Eur/kWh (**)	18,51 €	
			29,82 €
Subtotal			50,66 €
3	Impuesto de electricidad: Impuesto especial al tipo del 5,11269632% sobre el producto de la facturación de la electricidad suministrada		
	Impuesto electricidad (50,66 X 5,11269632 %)	2,59 €	
	Alquiler de equipos de medida y control. Precio establecido que se paga por el alquiler de equipos de medida y control.		
	Alquiler equipos de medida y control (28 días x 0,026785 Eur/día)	0,75 €	
Subtotal otros conceptos			3,34 €
Importe total			54,00 €
IVA: Impuesto sobre el Valor Añadido al tipo del 21%			
IVA NORMAL (21%) 21% s/ 54,00			11,34 €
TOTAL IMPORTE FACTURA			65,34 €
Precios de los términos del peaje de acceso publicados en Orden ETU 1282/2017			
PVPC calculado según Real Decreto RD 216/2014			
Margen de comercialización fijo publicado en RD 469/2016. Orden ETU 1948/2016			
Precio del alquiler de los equipos de medida y control en Orden IET 1491/2013 de 3 de agosto			
(*) Si desea más información sobre su consumo y el precio del kWh, puede consultarlo en nuestra página web https://www.endesaclientes.com/tarifasreguladas y sobre su consumo en la página web de su Distribuidor https://zonaprivada.endesadistribucion.es			
(**) Incluye el término variable horario de los costes de comercialización según lo establecido en el RD 469/2016 y en la Orden ETU/1948/2016.			

Figura 7. Ejemplo factura de la luz

1. Término por potencia contratada

Es el importe fijo de la factura. Es decir, va a ser el mismo todos los meses a no ser que se decida subir o bajar la potencia contratada. Es como una especie de cuota que se paga por estar conectado a la red eléctrica. Consta de dos importes distintos: importe por pajes de acceso e importe por término fijo de los costes de comercialización. La suma de cada uno de estos importes (€/kW) multiplicados previamente por la potencia contratada (kW) da lugar al importe total. Por lo tanto, a mayor potencia contratada, mayor será el precio a pagar.

Si recuperamos la tabla donde se indicaban los peajes de acceso, podemos comprobar que cada tarifa (2.0A, 2.0DHA, 2.0DHS) tiene dos importes distintos. El importe TPA corresponde al peaje de acceso de la potencia contratada comentado anteriormente y el TEA al de la energía consumida que se explicará a continuación.

Potencia ≤ 10 kW	SIN DISCRIMINACIÓN				CON DISCRIMINACIÓN				CON DISCRIMINACIÓN SUPERVALLE			
	TARIFA 2.0A				TARIFA 2.0DHA				TARIFA 2.0DHS			
	TPA €/kW y año	Δ (*)	TEA €/kWh	Δ (*)	TPA €/kW y año	Δ (*)	TEA €/kWh	Δ (*)	TPA €/kW y año	Δ (*)	TEA €/kWh	Δ (*)
	38,043426	0,00%	0,044027	0,00%	38,043426	0,00%	P1: 0,062012 P2: 0,002215	P1: 0,0% P2: 0,0%	38,043426	0,00%	P1: 0,062012 P2: 0,002879 P3: 0,000886	P1: 0,0% P2: 0,0% P3: 0,0%

Figura 8. Tabla de peajes de acceso a baja tensión y potencia inferior a 10kW

Inciso: Aunque tengamos una instalación fotovoltaica o no, el término de potencia contratada se seguirá pagando igual ya que la potencia contratada seguirá siendo la misma.

2. Término por energía consumida

Es el importe variable de la factura ya que depende del consumo de energía que se haga. Es decir, cuanta más electricidad se consuma, más se pagará. Igual que en el caso de la potencia, consta de dos importes distintos: importe por pajes de acceso e importe por coste de la energía. La diferencia respecto al término anterior radica en que aquí no medimos potencia (kW) sino consumo (kWh). La suma de cada uno de estos importes (€/kWh) multiplicados previamente por el consumo que hemos realizado (kWh) da lugar al importe total.

Inciso: Es este término el que se puede reducir al tener una instalación fotovoltaica ya que parte de estos kWh consumidos nos los proporcionarán nuestros paneles fotovoltaicos y los dejaremos de consumir de la red.

3. Impuestos y otros gastos

Una vez se tienen los dos términos anteriores calculados, se suman y a este importe total se le aplica el impuesto de la electricidad

- **Impuesto de la electricidad:** es un impuesto especial del 5,11%. El dinero recaudado se lo queda el Estado para apostar por energías alternativas.

Una vez se ha aplicado este impuesto, se procede a sumar el importe por alquiler de equipos de medida y control que suele ser tan solo el contador de consumo:

- **Alquiler del contador:** el contador eléctrico es propiedad de la distribuidora, que lo alquila por una pequeña suma mensual (entre 0,5 y 1,15 euros).

Finalmente, al importe obtenido se le aplica el impuesto sobre el valor añadido (IVA):

- **IVA:** es del 21%

Inciso: para saber la cantidad de euros que nos ahorramos en la factura con la instalación fotovoltaica habrá que cuantificar estos kWh que dejamos de consumir de la red y que nos los proporcionará nuestra instalación fotovoltaica, multiplicar esa cantidad por los dos importes asociados al término por energía consumida (importe por pajes de acceso e importe por coste de la energía.) y finalmente aplicar primero el 5,11% de impuesto de electricidad y seguidamente el 21% de IVA.

3.4.3. Tarifa eléctrica seleccionada

Para poder estudiar la rentabilidad de la instalación fotovoltaica y poder cuantificar exactamente la cantidad de dinero que nos ahorraríamos de pagar en la factura de la luz, se ha tenido que elegir una tarifa eléctrica en particular del mercado ya que de lo que se trata es

de hacer un estudio con valores reales. De este modo, se ha tratado de escoger una tarifa lo más estándar posible con un precio medio y que podamos usar como modelo.

Como tarifa estándar se ha cogido la tarifa de Precio Fijo dentro del mercado libre de la compañía Endesa. Este tipo de tarifa tiene un precio fijo conocido por el consumidor antes de contratar la tarifa (el precio está marcado por la compañía comercializadora y no por la Red Eléctrica de España) y además este precio se mantiene constante durante todo el año que dura el contrato. Se ha escogido la comercializadora Endesa ya que tiene unos precios medios dentro del mercado.

La tarifa según el peaje de acceso será la 2.0DHA. Es el peaje de acceso obligado por la compañía para poder contratar esta tarifa de Precio Fijo. Que sea DHA implica tener habilitada la opción de discriminación horaria. Tenerla habilitada no significa tenerla activa sino simplemente que exista la posibilidad de activarla si se quiere. En nuestro caso, la tendremos desactivada de manera que tendremos un único precio para todas las horas del día. Por otro lado, para tener la discriminación horaria habilitada se ha de tener un contador inteligente instalado en casa ya que se ha de saber cuántos kWh se consumen a cada hora del día. Supondremos que la vivienda ya está dotada de este contador ya que por normativa todas las viviendas deberán tenerlo instalado para 2019.

Así pues, a continuación, se muestran los precios de la tarifa elegida. El importe de la izquierda corresponde al término de potencia y el de la derecha al término de energía. En ambos está incluido el importe por peaje de acceso. Es decir, el precio que aparece a la izquierda corresponde al importe de peaje de acceso más el del término fijo y el de la derecha al importe de peaje de acceso más el coste de la energía. Esta tarifa es apta para cualquier potencia contratada siempre que sea inferior a 10kW.



The screenshot shows the Endesa website interface for the 'one Luz' tariff. At the top right is the Endesa logo. Below it, the text 'one Luz' is displayed. A message states: 'Muchas gracias por interesarte en nuestras ofertas. Contratando la tarifa **One Luz** disfrutarás de nuestro mejor precio online y podrás hacer todas tus gestiones por internet.' Below this, under the heading 'Precios', it specifies 'Precios para potencia contratada hasta 10 kW.' Two blue boxes provide the pricing details:

Término	Unidad	Precio
Término de potencia	€/kW y mes	3,429702
Término de energía	€/kWh	0,117412

Figura 9. Tarifa eléctrica seleccionada

4. Descripción de una instalación fotovoltaica doméstica

Para poder hacer un estudio de rentabilidad de una instalación fotovoltaica hay que conocer primero los componentes que la forman para poder determinar los gastos de inversión y de mantenimiento entre otros. De este modo, los elementos más importantes de una instalación fotovoltaica doméstica conectada a red sin sistema de acumulación (baterías) son:

- Paneles fotovoltaicos
- Inversor CC-CA
- Contador de generación
- Contador de consumo (ya se encuentra instalado en todas las viviendas)

A continuación, se muestra un diagrama en el que se representan de forma esquemática cada uno de estos elementos y su funcionamiento:

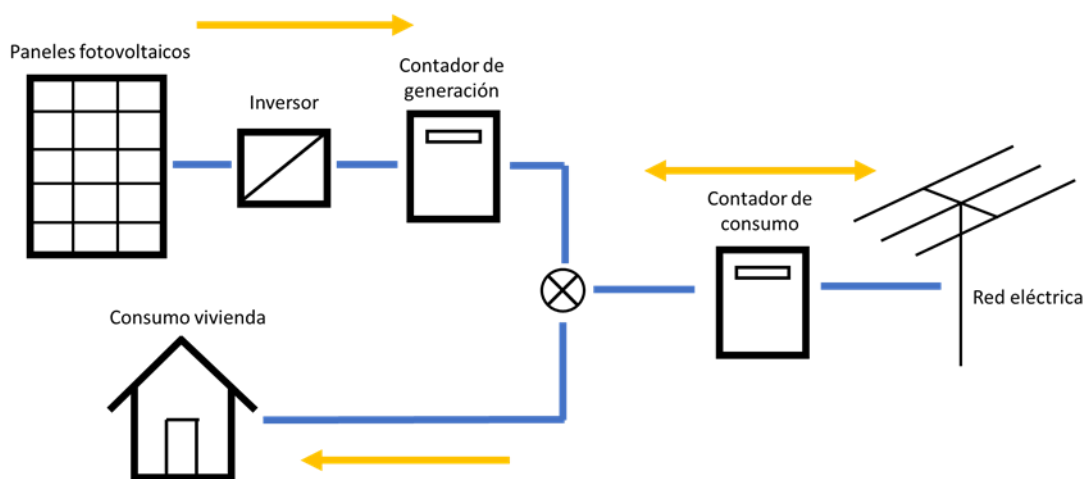


Figura 10. Diagrama de una instalación fotovoltaica doméstica conectada a red

Las placas fotovoltaicas son las encargadas de captar la radiación solar y transformarla en energía eléctrica. Esta energía eléctrica se encuentra en forma de corriente continua CC y debe ser convertida a corriente alterna CA para que pueda ser suministrada a la vivienda o inyectada a la red. El inversor es el encargado de realizar esta transformación. Seguidamente la energía pasa por el contador de generación donde queda registrada (es obligatorio por normativa registrar los kWh producidos por la instalación de autoconsumo). A continuación, la energía pasa a ser consumida por la vivienda. En caso que la vivienda requiera menos energía de la que se está generando por las placas, el excedente se inyecta a la red (sin coste para el propietario de la instalación, pero sin recibir nada a cambio por parte de la distribuidora eléctrica). En caso que el consumo de la vivienda sea superior a la energía producida por los paneles, se coge energía de la red pasando previamente por el contador de consumo donde queda registrada como se puede apreciar en la imagen.

Otros elementos necesarios para el funcionamiento de la instalación fotovoltaica son:

- Estructura de soporte de los paneles
- Cableado
- Protecciones
- Punto de conexión a red
- Puesta a tierra

A continuación, se encuentra una descripción más detallada de cada uno de estos elementos:

4.1. Paneles fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos son el elemento más importante de una instalación fotovoltaica ya que son los encargados de transformar la energía solar en energía eléctrica. Están formados por un conjunto de células fotovoltaicas que a partir de la luz que incide sobre ellos y mediante el efecto fotoeléctrico producen electricidad.

4.1.1. Tipos de paneles

Los paneles fotovoltaicos más utilizados en el mercado actual están hechos de silicio y en función del tipo de célula se dividen en: monocristalinos, policristalinos y amorfos. Estas 3 tecnologías son las que destacan sobre el resto ya que se instalan en el 90% de los sistemas fotovoltaicos actuales. También se pueden utilizar otros tipos de materiales como el Sulfuro y el Arsenio, pero son mucho menos comunes.

Módulos monocristalinos

Los módulos cristalinos, como su nombre indica, están compuestos por células monocristalinas. Éstas tienen una apariencia muy característica, ya que suelen estar recortadas en sus cuatro lados porque así reduce los costes de fabricación. Suelen tener un color negruzco.



Figura 11. Panel fotovoltaico monocristalino

Estos paneles son los más eficientes del mercado ya que están hechos de un silicio muy puro. Esto es porque la eficiencia de un panel fotovoltaico está sujeta principalmente a la calidad del silicio que contiene. Cuanto más puro sea el silicio, mejor convierte la energía solar en energía eléctrica.

Además, esta clase de paneles solares, son los que más vida útil poseen, hay garantías que llegan a más de 25 años. Por otro lado, son los más costosos porque su fabricación tiene el llamado proceso Czochralski, con el que se consigue bloques cilíndricos de silicio muy puro. Este proceso desperdicia mucho silicio.

Módulos policristalinos

Los paneles solares policristalinos están compuestos, en este caso, por células policristalinas y tienen un color azulado.



Figura 12. Panel fotovoltaico policristalino

El proceso de fabricación de estos paneles consiste en el corte de un bloque de silicio que se ha dejado solidificar previamente de forma lenta y que está formado por muchos pequeños cristales de silicio. Estos paneles, pues, no están formados a partir de un silicio tan puro como el de los monocristalinos cosa que hace que sean unos paneles más baratos de obtener, pero a la vez tengan una menor eficiencia. Esta menor eficiencia hace que se necesite más superficie de captación solar (más espacio) para conseguir una potencia igual que la que se conseguiría con paneles monocristalinos.

Módulos de silicio amorfo (o de capa fina)

Los paneles de silicio amorfo tienen un funcionamiento muy parecido a los paneles cristalinos explicados anteriormente pero su elaboración es muy diferente. Utilizan un silicio poco puro cosa que hace que sean los paneles más baratos de entre los tres explicados. Por otro lado, son paneles flexibles que se adaptan a diversas superficies y esto hace que su instalación sea más cara porque debe poseer de estructuras más complejas.



Figura 13. Panel fotovoltaico amorfo

El hecho de utilizar silicio de peor calidad hace que el panel sea el menos eficiente de los 3 y que por lo tanto requiera de un gran espacio (bastante mayor que con los policristalinos) para que su potencia pueda competir equitativamente con los paneles fotovoltaicos monocristalinos.

4.1.2. Panel fotovoltaico para el hogar

Teniendo en cuenta estas principales características:

- Eficiencia: Monocristalinos > Policristalinos > Capa fina
- Precio: Monocristalinos > Policristalinos > Capa fina
- Durabilidad: Monocristalinos > Policristalinos > Capa fina

En términos generales, los paneles policristalinos son los que generalmente se recomiendan para las casas domésticas ya que tienen un precio razonable, no tan elevado como los monocristalinos, y una eficiencia razonable también, no tan baja como en el caso de los de capa fina. Sin embargo, si el hogar tiene problemas de espacio o se encuentre en una zona con temperatura excesivamente altas se debe de optar por los paneles monocristalinos ya que requieren de menos superficie y funcionan mejor que los policristalinos con altas temperaturas. Por el otro lado, si la casa tiene mucha superficie disponible los paneles de capa fina serían una buena opción.

4.1.3. Características eléctricas de los paneles

Las características eléctricas de un panel fotovoltaico se miden en un ambiente controlado en temperatura y radiación. Más concretamente, se establecen a partir de unas condiciones universales de trabajo llamadas "condiciones estándar de medida (CEM) " concretadas en los siguientes parámetros:

- Irradiancia solar: 1.000 W / m²
- Distribución espectral: AM 1,5 G.
- Temperatura de la célula: 25°C.

Las características eléctricas de una placa que necesitaremos conocer para realizar y entender los posteriores cálculos son las siguientes:

- **Potencia nominal (P_{max}) o potencia pico (P_p):** es la mayor potencia que puede proporcionar el panel (medido en las condiciones anteriores comentadas (CEM)). Es la característica más importante y es la que se usa para definir cada panel, como veremos más adelante.
- **Tensión de máxima potencia (V_{max}):** es la tensión que puede dar el módulo trabajando en la máxima potencia.
- **Intensidad de máxima potencia (I_{max}):** es la intensidad que puede dar el módulo trabajando en la máxima potencia.
- **Eficiencia del panel:** es la relación entre la potencia que produce el módulo en función de la potencia de radiación incidente en el módulo. Por lo tanto, será el

resultado de dividir la potencia producida por el panel entre la potencia de la radiación incidente sobre el mismo.

Todos estos valores vienen especificados por el fabricante en la tabla de características de cada panel.

4.1.4. Cálculo de la producción energética de un panel

Una de las peculiaridades de este proyecto es que se pretende calcular la rentabilidad de una instalación fotovoltaica teniendo en cuenta el consumo y la radiación a cada hora del día. Es por eso, que nos interesa saber cuál es la energía que producen los paneles a cada hora.

A continuación, se muestra como se ha obtenido esta producción por horas. Antes, pero, se van a definir una serie de conceptos necesarios para entender el cálculo.

Rendimiento global de la instalación (PR):

- **Panel fotovoltaico:** las pérdidas en los módulos fotovoltaicos, de manera resumida, se deben a los efectos de la temperatura (a más temperatura, menos rendimiento), y a la suciedad del cristal (Polvo ...). Estas pérdidas pueden adoptar un valor en torno al 9% (0,91).
- **Inversor:** el rendimiento en los equipos de transformación oscila entre el 92 y el 96%. Se asumirá un valor de pérdidas del 6% (0,94).
- **Cableado y dispersión de parámetros:** se establecerán unas pérdidas del 5% (0,95).

La multiplicación de los coeficientes definidos determina, de manera aproximada, el rendimiento global de la instalación o PR (Performance Ratio) y que es un parámetro determinante en el cálculo de la productividad energética de una instalación fotovoltaica conectada a red:

$$PR = 0,91 \cdot 0,94 \cdot 0,95 = 0,81$$

Ecuación 3. Rendimiento global de la instalación (PR)

Factor de sombras (FS): uno de los factores importantes que hacen reducir la producción eléctrica de un panel son las sombras que otros objetos pueden hacer sobre su superficie. Se ha considerado un coeficiente del 6% (FS=0,94).

Potencia real del panel (PP): conviene considerar unas pérdidas del 5% ya que, a falta de experiencia real, puede ser que la potencia real del módulo se encuentre en realidad levemente por debajo que la declarada por el fabricante (PP=0,95).

Una vez definidos estos conceptos, se procede a demostrar cómo se han realizado los cálculos. A continuación, se muestran dos opciones distintas pero muy relacionadas entre sí [4][5]:

Opción 1:

$$E = G \cdot Ef \cdot A \cdot FS \cdot PR \cdot PP \quad [kWh]$$

Ecuación 4. Energía producida por un panel (opción 1)

Siendo:

E = energía producida por un panel a una hora determinada [kWh]

G = irradiancia solar a una hora determinada [kWh/m²]

Ef = eficiencia del panel fotovoltaico

A = área del panel fotovoltaico [m²]

FS = factor de sombras

PR = rendimiento global de la instalación

PP = rendimiento real del módulo

Opción 2:

Sabemos que la eficiencia de un panel es el resultado de dividir la potencia producida por el panel entre la potencia de la radiación incidente sobre el mismo. Sabemos que en condiciones estándares de medida CEM, si aplicamos una irradiancia solar de 1 kWh/m² el panel proporciona una potencia Pmax (kWh). Para poder dividir Pmax entre 1 kWh/m² es necesario dividir primero Pmax (kWh) entre los m² de la placa ya que las placas no tienen por qué medir tan solo 1 m². Por lo tanto:

$$Ef = \frac{\frac{Pmax}{A}}{G^*}$$

Siendo $G^* = \frac{1kWh}{m^2}$ y $A = \text{superficie de la placa [m}^2\text{]}$

$$Ef \cdot A = \frac{\frac{Pmax}{A}}{G^*} \cdot A = \frac{Pmax}{G^*}$$

Ecuación 5. Relación entre eficiencia y Pmax de un panel

En definitiva, la segunda forma de calcular la energía generada por un panel es:

$$E = G \cdot \frac{Pmax}{G^*} \cdot FS \cdot PR \cdot PP \quad [kWh]$$

Ecuación 6. Energía producida por un panel (opción 2)

Siendo:

E = energía producida por un panel a una hora determinada [kWh]

G = irradiancia solar a una hora determinada [kWh/m²]

P_{max} = potencia pico del panel [kW]

G^* = irradiancia solar estándar 1kWh/m²

FS = factor de sombras

PR = rendimiento global de la instalación

PP = rendimiento real del módulo

Para realizar los cálculos se utilizará la opción 2 ya que facilita los mismos como se verá más adelante. Para obtener la producción energética de un conjunto de paneles basta con sustituir la P_{max} de la fórmula por la suma de las P_{max} de cada uno de los paneles.

4.1.5. Dimensionado de la instalación

Una instalación fotovoltaica suele estar formada por más de un panel. El dimensionado no es más que el número de paneles que se encuentran en una instalación fotovoltaica. Y el conjunto de paneles determinan la potencia de la instalación fotovoltaica (potencia instalada).

$$Potencia\ instalada = P_{total} = \sum_{i=1}^N P_{max} [kW] \quad \text{con } N = n^{\circ} \text{ de paneles fotovoltaicos}$$

Ecuación 7. Potencia instalada (P_{total})

Uno de los objetivos del trabajo es comprobar la rentabilidad de la instalación para varios dimensionados distintos y estudiar cuál de ellos es el más óptimo. Por ese motivo, se va a realizar un estudio de rentabilidad para cada uno de los distintos dimensionados posibles. Estos dimensionados irán desde una potencia fotovoltaica de 0kW hasta una potencia igual a la potencia contratada de la vivienda con intervalos de 0,1kW. Es decir, para el perfil de consumo caso A, como tiene una potencia contratada de 9,2kW, se realizará un estudio de rentabilidad a cada uno de sus 92 dimensionados posibles. Para el caso F (potencia contratada de 5,75kW), sin embargo, se realizarán 58. Se ha elegido la potencia contratada como límite ya que según el RD de autoconsumo 900/2015 la máxima potencia fotovoltaica que se puede instalar en una vivienda debe ser inferior o igual a la potencia contratada de la misma vivienda.

4.1.6. Conexión de los paneles

Si una instalación está formada por más de un panel, es necesario especificar como se van a conectar entre ellos. El conexionado es un aspecto relevante en una instalación fotovoltaica ya que determina ciertas características que debe tener el inversor, como se verá más adelante. Los tipos de conexiones que existen son los de en serie (1) y en paralelo (2) y sus sistemas combinados (3):

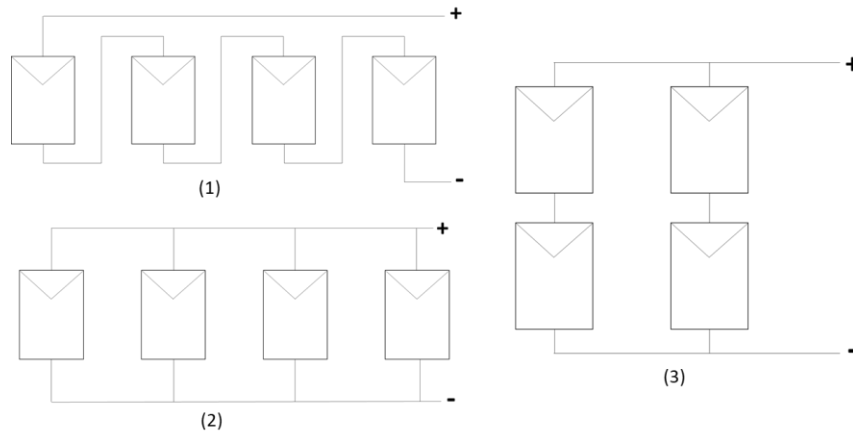


Figura 14. Possibles connexions entre panells

4.2. Estructura de soport del panel

Es el sistema de fijación de los módulos. La estructura debe tener un anclaje que la haga resistente a la acción de los agentes atmosféricos y debe mantener los paneles con la orientación e inclinación deseados.

Existen distintas estructuras para los paneles dependiendo de su lugar de colocación (suelo, tejado, pared, poste, etc) y de si se le quiere dar una inclinación determinada al panel respecto la base o si, por lo contrario, se quiere colocar con la misma inclinación que la base.

4.3. Inversor

El inversor es el encargado de transformar la corriente continua (CC) entregada por el generador fotovoltaico (conjunto de las placas) en corriente alterna (CA) monofásica a 230V de tensión nominal (si hablamos de grandes instalaciones, que no es nuestro caso, se ha de transformar en corriente alterna trifásica a 400V de tensión nominal).

4.3.1. Características eléctricas del inversor

Las características principales de un inversor son:

- Potencia nominal CC (P_{CCnom})
- Rango de tensión MPP (punto de máxima potencia)
 - $U_{FVinferior}$: límite inferior de tensión del rango MPP
 - $U_{FVsuperior}$: límite superior de tensión del rango MPP
- Tensión máxima CC admisible (U_{CCmax})
- Intensidad nominal CC (I_{CCnom})
- Intensidad máxima CC admisible (I_{CCmax})

4.3.2. Pasos a seguir para determinar el inversor adecuado

Hay dos aspectos principales que hay que considerar a la hora de seleccionar el inversor adecuado y son: la potencia del generador fotovoltaico y la conexión que se ha utilizado para los paneles.

Para que se trabaje al máximo de la potencia nominal la mayor parte del tiempo, es necesario que la potencia del generador fotovoltaico sea superior a la potencia del inversor. Esto es porque el generador operará siempre con un rendimiento máximo de alrededor al 75% como se ha visto antes por efectos de la suciedad en las placas, el rendimiento real de los dispositivos, el efecto de las sombras, etc. Por ese motivo, con carácter general, el sobredimensionamiento del generador fotovoltaico es de un 10 a un 20% mayor que la potencia del inversor [4][5], es decir:

$$P_{inversor} = P_{CCnom} (Potencia nominal)$$

$$P_{inversor} = (0,8 \text{ a } 0,9) \cdot P_{total}$$

Ecuación 8. Potencia del inversor a partir de Ptotal

Nosotros le daremos un valor intermedio de 0,85. De esta manera:

$$P_{inversor} = 0,85 \cdot P_{total}$$

En cuanto al conexionado entre módulos, es importante también ya que este define la intensidad y el voltaje característicos del inversor ($U_{FVinferior}$, $U_{FVsuperior}$, U_{CCmax} , I_{CCnom} , I_{CCmax}). Ahora bien, lo que marca realmente el precio del inversor (que es lo que nos interesa) es su potencia nominal P_{CCnom} , por lo que el conexionado entre módulos (y, por consiguiente, la intensidad y el voltaje característicos del inversor) no será necesario tenerlo en cuenta para los cálculos que se realizarán más adelante sobre la rentabilidad.

4.4. Contador de generación

El RD de autoconsumo 900/2015 establece que para instalaciones fotovoltaicas tipo 1 (<100kW) será obligatorio instalar un contador en el circuito de generación para medir la energía producida por las placas fotovoltaicas.

4.5. Cableado

Según el pliego de condiciones técnicas de la IDAE [6], el cableado tendrá que ser de cobre y tener la tensión adecuada para evitar caídas de tensión y calentamientos. Concretamente, para cualquier condición de trabajo, los conductores deberán tener la sección suficiente para que la caída de tensión sea inferior del 1,5 %.

Además, los cables deberán tener la longitud necesaria para no generar esfuerzos en los diversos elementos ni posibilidad de enganche por el tránsito normal de personas.

Nuestra instalación constará de dos tipos de cableado distinto. Por un lado, se requerirá de un cable de corriente continua que conecte las placas con el inversor y, por el otro lado, se requerirá un cable de corriente alterna monofásica que conecte el inversor con el cuadro de mandos incluyendo el contador de generación.

4.6. Protecciones

La instalación deberá de disponer de los equipos de seguridad necesarios como fusibles o interruptores de protección cumpliendo con lo dispuesto en el Real Decreto 1663/2000 (artículo 11) sobre protecciones en instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red de baja tensión.

4.7. Conexión a red

Es necesario conectar la instalación fotovoltaica con la red de distribución. La ubicación y características del punto de conexión es competencia directa de la compañía eléctrica y esto implica que la petición de este punto es uno de los trámites administrativos que se deben realizar cuando se quiere montar una instalación fotovoltaica conectada a red. De manera general, este punto de conexión se situará siempre en la red de distribución o en la conexión general del abonado; sin embargo, será la compañía la que determine su ubicación y las condiciones técnicas que se deben cumplir. Además, esta conexión deberá cumplir con lo dispuesto en el Real Decreto 1663/2000 (artículos 8 y 9) sobre conexión de instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red de baja tensión. El hecho de tener que realizar una conexión a la red implicará un coste adicional al proyecto que ya se ha comentado anteriormente y que sería el de la visita de verificación para por parte de la distribuidora eléctrica para comprobar que la instalación se ha realizado y conectado correctamente.

4.8. Puesta a tierra

El Artículo 12 del Real Decreto 1663/2000 establece las condiciones de puesta a tierra de las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red eléctrica de baja tensión. Según este artículo, las masas de la instalación fotovoltaica estarán conectadas a un punto de tierra independiente del neutro de la empresa distribuidora, así como de las masas del resto de suministros.

5. Programa de simulación de rentabilidad

A continuación, se muestra el proceso que se ha seguido para determinar si una instalación fotovoltaica es rentable o no para un perfil de consumo determinado y, en caso que lo sea, cuál es el dimensionado que más le conviene.

Para agilizar y automatizar los estudios de rentabilidad se ha creado un programa de simulación. La idea de este programa es que nos indique la rentabilidad de una instalación fotovoltaica para un perfil de consumo y un dimensionado determinados. De esta forma se va a tratar de crear un programa que simplemente indicando el consumo de una vivienda y el dimensionado (es decir, la potencia instalada = P_{total}) que queremos que tenga la instalación, además de otros parámetros que explicaremos más adelante, nos pueda dar un valor de rentabilidad.

Como indicador de rentabilidad se ha escogido la Tasa Interna de Rentabilidad (TIR). El período de estudio será de 25 años desde la puesta en marcha de la instalación. Se ha escogido 25 años ya que, como veremos más adelante, las placas y la estructura de soporte tienen una garantía de 25 años (y una esperanza de vida superior), el contador de generación tiene una garantía de 5 años, pero una esperanza de vida superior a 25 años y finalmente el inversor tiene una garantía de 5 años, pero una esperanza de vida de entre 10 y 15 años (será necesaria su sustitución, pues, a mitad de período).

Para realizar el estudio de rentabilidad es necesario conocer primero la cantidad de energía que nos ahorramos de consumir de la red y así poder contabilizar posteriormente el ahorro energético y, por consiguiente, el ahorro económico. De este modo, el programa se ha dividido en dos partes: la primera parte del programa nos determinará la cantidad de kWh que se dejan de consumir de la red durante 1 año y, la segunda parte, nos hará el estudio de rentabilidad para 25 años dando como resultado final la TIR. En definitiva, la idea es que una vez ya hayamos introducido el perfil de consumo que queremos estudiar en el programa (y una serie de parámetros más que ahora veremos), únicamente cambiando un número (la potencia instalada P_{total}) el programa nos indique la rentabilidad de dicha instalación para ese perfil de consumo.

5.1. Simulación de la producción de energía y del consumo de una instalación fotovoltaica

A continuación, se explica la primera parte del programa. Como se ha dicho, ésta nos determinará la cantidad de kWh que se dejan de consumir de la red durante 1 año.

A continuación, se muestra una imagen donde se puede observar su estructura:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2						Ptotal (kW)								Balance energético anual (kWh/año)
3						PR							Esp	
4						FS							Esr	
5						PP							Ev	
6														
7			Econ		G		Egen (kWh)		Energía suministrada por cada fuente					
8	DÍA	HORA	CONSUMO (kWh)	IRRADIANCIA GLOBAL (Wh/m²)					Esp (kWh)	Esr (kWh)	Ev			
9	01/01/2018	0:00												
10	01/01/2018	1:00												
11	01/01/2018	2:00												
12	01/01/2018	3:00												
13	01/01/2018	4:00												
14	01/01/2018	5:00												
15	01/01/2018	6:00												
16	01/01/2018	7:00												
17	01/01/2018	8:00												
18	01/01/2018	9:00												
19	01/01/2018	10:00												
20	01/01/2018	11:00												
21	01/01/2018	12:00												
22	01/01/2018	13:00												
23	01/01/2018	14:00												
24	01/01/2018	15:00												
25	01/01/2018	16:00												
26	01/01/2018	17:00												
27	01/01/2018	18:00												
28	01/01/2018	19:00												
29	01/01/2018	20:00												
30	01/01/2018	21:00												
31	01/01/2018	22:00												
32	02/01/2018	0:00												

Figura 15. Programa de simulación (parte 1). Simulación de la producción de energía y del consumo de una instalación fotovoltaica

Esta primera parte del programa funciona de la siguiente manera:

1. Se inserta el consumo (Econ) y la radiación solar (G) por horas durante los 365 días del año

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2						Ptotal (kW)			
3						PR			
4						FS			
5						PP			
6									
7		DÍA	HORA	Econ	G		Egen (kWh)		Energía sum Esp (kW)
8		01/01/2018	0:00	0,48464	0,00000				
9		01/01/2018	1:00	0,51094	0,00000				
10		01/01/2018	2:00	0,39422	0,00000				
11		01/01/2018	3:00	0,58781	0,00000				
12		01/01/2018	4:00	1,30649	0,00000				
13		01/01/2018	5:00	0,29095	0,00000				
14		01/01/2018	6:00	0,37454	0,00000				
15		01/01/2018	7:00	0,22063	0,01324				
16		01/01/2018	8:00	0,17074	0,03949				
17		01/01/2018	9:00	0,36443	0,17539				
18		01/01/2018	10:00	0,17526	0,11927				
19		01/01/2018	11:00	0,33135	0,17014				
20		01/01/2018	12:00	1,18653	0,33623				
21		01/01/2018	13:00	0,49996	0,19229				
22		01/01/2018	14:00	0,19676	0,23041				
23		01/01/2018	15:00	0,37906	0,02181				

Figura 15.1. Paso 1 Programa de simulación (parte 1).

2. Se introducen los coeficientes de pérdidas

- Rendimiento global de la instalación (PR) = 0,81
- Factor de sombras (FS) = 0,94
- Potencia real del panel (PP) = 0,95

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2						Ptotal (kW)			
3						PR	0,81		
4						FS	0,94		
5						PP	0,95		
6			Econ	G					Energía sum
7	DÍA	HORA	CONSUMO (kWh)	IRRADIANCIA GLOBAL (Wh/m²)			Egen (kWh)		Esp (kW)
8	01/01/2018	0:00	0,48464	0,00000					
9	01/01/2018	1:00	0,51094	0,00000					
10	01/01/2018	2:00	0,39422	0,00000					
11	01/01/2018	3:00	0,58781	0,00000					
12	01/01/2018	4:00	1,30649	0,00000					
13	01/01/2018	5:00	0,29095	0,00000					

Figura 15.2. Paso 2 Programa de simulación (parte 1).

3. Se introduce la potencia total del generador fotovoltaico

Esta potencia es la suma de todas las potencias pico (Pmax) de los paneles fotovoltaicos como hemos visto anteriormente en la *Ecuación 7*.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2						Ptotal (kW)	4		
3						PR	0,81		
4						FS	0,94		
5						PP	0,95		
6			Econ	G					Energía sum
7	DÍA	HORA	CONSUMO (kWh)	IRRADIANCIA GLOBAL (Wh/m²)			Egen (kWh)		Esp (kW)
8	01/01/2018	0:00	0,48464	0,00000					
9	01/01/2018	1:00	0,51094	0,00000					
10	01/01/2018	2:00	0,39422	0,00000					
11	01/01/2018	3:00	0,58781	0,00000					
12	01/01/2018	4:00	1,30649	0,00000					
13	01/01/2018	5:00	0,29095	0,00000					

Figura 15.3. Paso 3 Programa de simulación (parte 1).

4. A partir de este momento, el programa calcula automáticamente todos los valores deseados. Primero calcula la energía generada por los paneles a cada hora durante los 365 días del año.

Para calcular esta energía se ha hecho uso de la *Ecuación 6*. comentada anteriormente.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1						Ptotal (kW)	4				
2						PR	0,81				
3						FS	0,94				
4						PP	0,95				
5			Econ	G							Energía suministrada por cada fuente
6											Esp (kW) Esr (kW) Ev
7	DÍA	HORA	CONSUMO (kWh)	IRRADIANCIA GLOBAL (Wh/m²)			Egen (kWh)				
8	01/01/2018	0:00	0,48464	0,00000			0,00000				
9	01/01/2018	1:00	0,51094	0,00000			0,00000				
10	01/01/2018	2:00	0,39422	0,00000			0,00000				
11	01/01/2018	3:00	0,58781	0,00000			0,00000				
12	01/01/2018	4:00	1,30649	0,00000			0,00000				
13	01/01/2018	5:00	0,29095	0,00000			0,00000				
14	01/01/2018	6:00	0,37454	0,00000			0,00000				
15	01/01/2018	7:00	0,22063	0,01324			0,03831				
16	01/01/2018	8:00	0,17074	0,03949			0,11426				
17	01/01/2018	9:00	0,36443	0,17539			0,50746				
18	01/01/2018	10:00	0,17526	0,11927			0,34509				
19	01/01/2018	11:00	0,33135	0,17014			0,49227				
20	01/01/2018	12:00	1,18653	0,33623			0,97282				
21	01/01/2018	13:00	0,49996	0,19229			0,55636				
22	01/01/2018	14:00	0,19676	0,23041			0,66665				

Figura 15.4. Paso 4 Programa de simulación (parte 1).

6

3
0,93
0,94
0,95

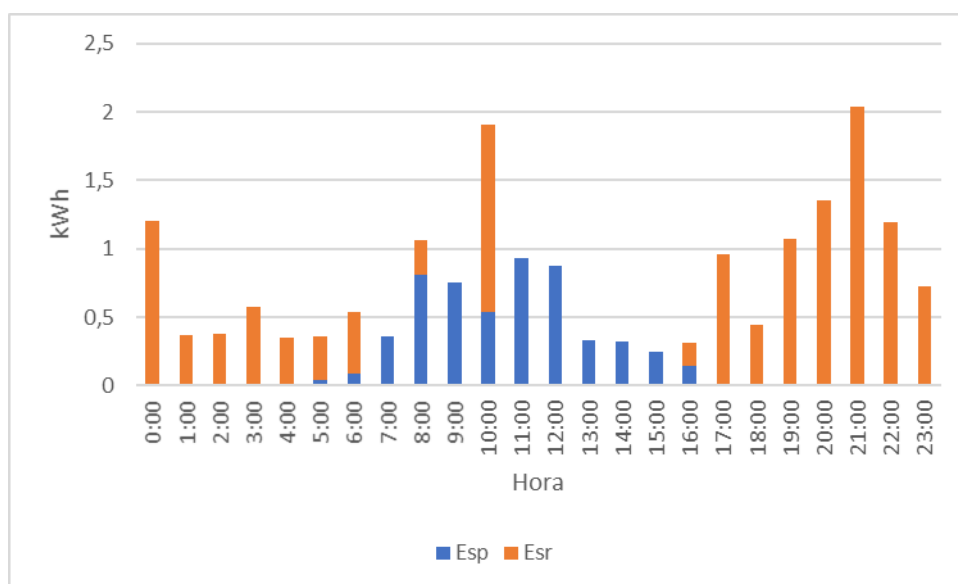


Figura 16. *Programa de simulación (parte 1)*. Suministro detallado por horas para un día determinado

5.2. Simulación de la rentabilidad de una instalación fotovoltaica

Una vez determinado el ahorro energético, se puede proceder a realizar el análisis de rentabilidad. Para ello se deberá tener en cuenta tanto los gastos de inversión como el resto de gastos e ingresos producidos durante los 25 años posteriores a la puesta en marcha de la instalación.

La idea de esta segunda parte del programa es que nos calcule todos estos gastos e ingresos (teniendo en cuenta el ahorro energético obtenido por la primera parte del programa) y que nos proporcione como resultado final el dato de rentabilidad TIR además de otros datos de interés que ahora veremos.

A continuación, se explica cómo se ha determinado en el programa el ahorro económico, los gastos de inversión, los gastos de mantenimiento y el resto de pagos y costes.

5.2.1. Ahorro económico

En el apartado de factura eléctrica se ha especificado que componente de la factura se dejaría de pagar en caso de tener una instalación fotovoltaica. Este componente es el llamado término por energía consumida.

Para saber la cantidad exacta en euros que nos ahorramos habrá que cuantificar los kWh anuales que dejamos de consumir de la red y que nos los proporciona nuestra instalación fotovoltaica (ya se conocerán gracias a la primera parte del programa), multiplicar esa cantidad por los dos importes asociados al término por energía consumida (importe por pajes de acceso e importe por coste de la energía) y finalmente aplicar primero el 5,11% de impuesto de electricidad y seguidamente el 21% de IVA. Recordemos que los dos importes

asociados al término de energía ya se encuentran sumados en la tarifa escogida con un valor de 0,117412€/kWh.

Precios <i>Precios para potencia contratada hasta 10 kW.</i>	
Término de potencia €/kW y mes	3,429702
Término de energía €/kWh	0,117412

Figura 17. Precios de la tarifa eléctrica seleccionada

La expresión que nos calcula este ahorro económico anual es:

$$I = Esp \cdot TE \cdot IE \cdot IVA \quad [€/año]$$

Ecuación 10. Ahorro económico anual

Siendo:

I = cantidad anual que se deja de pagar en la factura de la luz [€/año]

Esp = energía anual suministrada por las placas [kWh]

TE = término de energía [€/kWh] = 0,117412€/kWh

IE = impuesto de electricidad = 1,0511

IVA = impuesto sobre el valor añadido = 1,21

5.2.1.1. Reducción del rendimiento de los equipos

Los componentes de la instalación verán reducirse su rendimiento debido al deterioro que sufrirán dado su continuo uso y el paso de los años. Para tener en cuenta este factor, se aplicará una tasa de reducción del rendimiento. Esta tasa tendrá un valor de 0,5% y se aplicará sobre el coeficiente PR (rendimiento global de la instalación).

$$PR^t = PR \cdot (Tr)^{t-1}$$

Ecuación 11. Reducción del rendimiento de los equipos

Siendo:

PR^t = rendimiento global de la instalación en el año t

PR = rendimiento global de la instalación = 0,81

Tr = tasa de reducción del rendimiento = 0,995

Este factor influirá pues en la *Ecuación 10.* sobre el ahorro económico ya tendrá un impacto en el valor de Esp ya que hará que la energía anual suministrada por las placas sea cada año levemente menor.

5.2.1.2. Evolución del €/kWh en España

El precio del kWh en España ha ido variando significativamente en los últimos años. Dado que se va a hacer un estudio de rentabilidad para 25 años, se ha encontrado razonable estudiar esta evolución del precio del kWh en España y tenerlo en cuenta en los cálculos.

Una de las posibilidades para tener en cuenta el posible aumento o disminución del precio del kWh ha sido utilizar el IPC (Índice de Precios de Consumo). Esta opción, pero, ha quedado descartada ya que el IPC se calcula a partir de muchos grupos distintos siendo la ponderación para el precio de la electricidad muy baja.

Lo que se ha tratado entonces ha sido buscar algún índice o previsión más específico. Es decir, lo que se ha tratado de buscar ha sido el precio del kWh en España para consumidores domésticos de mediana potencia. Además, no se buscaba el precio total del kWh sino tan solo el importe del “término de energía consumida” que es el que nos interesa. Al ser la búsqueda tan acotada y al depender este precio de muchos factores difíciles de predecir, no se encontró ninguna previsión hecha por algún organismo fiable.

Por ese motivo se plantearon dos escenarios: el primer escenario consistió en imaginar que el precio se mantiene constante (es la situación más desfavorable para el cálculo de la rentabilidad ya que como se verá más adelante el precio del kWh tiende a subir, al menos en los últimos años). El segundo escenario consistió en analizar el precio del término de consumo del kWh en España para consumidores de mediana potencia de los últimos años y establecer una tasa de crecimiento.

Desde que entró en vigor en 2014 la normativa del gobierno que regula el nuevo sistema para determinar el coste de la energía (Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor (PVPC)), la Red Eléctrica de España ha ido publicando cada día el precio del término de energía que habrá para el día siguiente detallado por horas. Es por eso que los datos de estos precios desde los últimos 4 años se encuentran públicos en su página web.

A continuación, se muestra una tabla en la que se especifica el precio del término de energía detallado por meses de estos últimos 4 años.

	2014	2015		2016		2017		2018	
	Precio 2014	Precio 2015	14-15 %	Precio 2016	15-16 %	Precio 2017	16-17 %	Precio 2018	17-18 %
enero	0,109535	0,128864	17,65%	0,103434	-19,73%	0,147407	42,51%	0,119465	-18,96%
febrero	0,100357	0,118911	18,49%	0,091902	-22,71%	0,120450	31,06%	0,122708	1,87%
marzo	0,100357	0,117917	17,50%	0,091716	-22,22%	0,111205	21,25%	0,115592	3,94%
abril	0,095084	0,120668	26,91%	0,086840	-28,03%	0,111242	28,10%		
mayo	0,110925	0,117993	6,37%	0,087910	-25,50%	0,112542	28,02%		
junio	0,119266	0,126553	6,11%	0,100455	-20,62%	0,113439	12,93%		
julio	0,116649	0,132257	13,38%	0,102656	-22,38%	0,113044	10,12%		
agosto	0,120844	0,125558	3,90%	0,103976	-17,19%	0,113056	8,73%		
septiembre	0,130951	0,118390	-9,59%	0,106121	-10,36%	0,113611	7,06%		
octubre	0,129899	0,116995	-9,93%	0,118514	1,30%	0,124705	5,22%		
noviembre	0,121413	0,122399	0,81%	0,122669	0,22%	0,129257	5,37%		
diciembre	0,122380	0,122882	0,41%	0,130231	5,98%	0,140714	8,05%		

Figura 18. Tabla del precio del término de energía del kWh en España

Para establecer la tasa de crecimiento anual, se han considerado los últimos 48 meses (4 años) y se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$Tasa\ de\ crecimiento\ anual = \left[\left(\frac{f}{i} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \cdot 100$$

Ecuación 12. Tasa de crecimiento anual

Siendo:

f = valor final

i = valor inicial

n = número de años

Para nuestro caso en particular $f = 0,115592$ €/kWh (marzo 2018), $i = 0,100357$ €/kWh (marzo 2014) y $n=4$ años:

$$Tasa\ de\ crecimiento\ anual = T_{€/kWh} = \left[\left(\frac{0,115592}{0,100357} \right)^{1/4} - 1 \right] \cdot 100 = 3,5964\%$$

Ecuación 13. Tasa de crecimiento anual del término de energía en España

La tasa obtenida ha sido de +3,5964%. Esta tasa $T_{€/kWh}=1,035964$ la aplicaremos sobre el término de energía consumida (TE) de manera que la ecuación que determina la cantidad anual que se deja de pagar en la factura de la luz quedará de la siguiente manera:

$$I_{anual}^t = Esp \cdot [(T_{€/kWh})^{t-1} \cdot TE] \cdot IE \cdot IVA \quad [€]$$

Ecuación 14. Ahorro económico anual con $T_{€/kWh}$

Como vemos, ha quedado en función de t (período = año). Esta tasa, a diferencia de la de reducción del rendimiento explicada anteriormente, hará que el ahorro económico sea cada año mayor.

5.2.2. Gastos de inversión

El objetivo de este apartado es que los gastos de inversión dependan únicamente de la potencia instalada (P_{total}). Para ello, se ha tratado de encontrar una expresión matemática que nos determine el gasto de inversión de cada uno de los componentes de la instalación en función únicamente de la potencia instalada.

Para poder construir esta expresión se ha hecho un estudio de mercado en el que se han comparado precios de cada uno de los componentes de las principales vendedoras del mercado, entre las que se encuentran Autosolar España o Solarmat entre otras.

A continuación, se muestra la expresión obtenida para cada uno de ellos:

5.2.2.1. Paneles fotovoltaicos

Sabemos que nuestra instalación fotovoltaica constará de un único modelo de placa y que en función de la potencia total que se requiera se escogerá un mayor o menor número de unidades. Así pues, se ha procedido a escoger un panel concreto del mercado. Dentro de los distintos tipos de paneles (monocristalino, policristalino, amorfo) se ha optado por el panel policristalino ya que es el panel que mejor relación tiene en cuanto a rendimiento, precio y espacio. Seguidamente se ha tratado de buscar un panel policristalino lo más estándar posible con un precio, rendimiento y espacio medio (como viene siendo el criterio que hemos adoptado desde el inicio del proyecto).

El panel escogido ha sido el Panel Solar 250W Policristalino Atersa con un precio de 250€.

Su tabla principal de características es:

Panel Solar 250W Policristalino	
Pmax (Pp)	250 W
Vmax	29,53 V
Imax	8,45 A
Eficiencia	15,35 %
Dimensiones	1645x990x40mm
Garantía	25 años

Tabla 2. Características del panel seleccionado

La expresión matemática que determina el coste de inversión de los paneles en función del número de paneles [N] es:

$$C_{\text{paneles}} = 250 \cdot N \quad [€]$$

Ecuación 15. Coste inversión paneles en función del nº unidades

La misma expresión en función de la potencia fotovoltaica [kW] sería:

$$N = \frac{P_{\text{total}}}{0,25}$$

$$C_{\text{paneles}} = 1000 \cdot P_{\text{total}} \quad [€]$$

Ecuación 16. Coste inversión paneles en función de la potencia instalada

5.2.2.2. Estructura de los paneles

Como se ha dicho anteriormente, existen distintos tipos de estructuras. Para poder construir una expresión matemática con precisión se ha supuesto que la placas irán colocadas sobre el tejado adoptando su inclinación (como ocurre en la mayoría de instalaciones domésticas). Seguidamente se ha buscado un modelo compatible con la placa fotovoltaica elegida. Este modelo elegido es: Estructura Cubierta KHT915 (25 años de garantía). Su precio varía en función del número de unidades que se compren. A continuación, a base de ejemplo, se muestra la gráfica en la que se representa el coste en euros en el eje de las ordenadas en función del número de unidades de estructura (=número de paneles solares) en el eje de las abscisas. A partir de estos puntos, se ha obtenido la expresión matemática que más se ajusta.

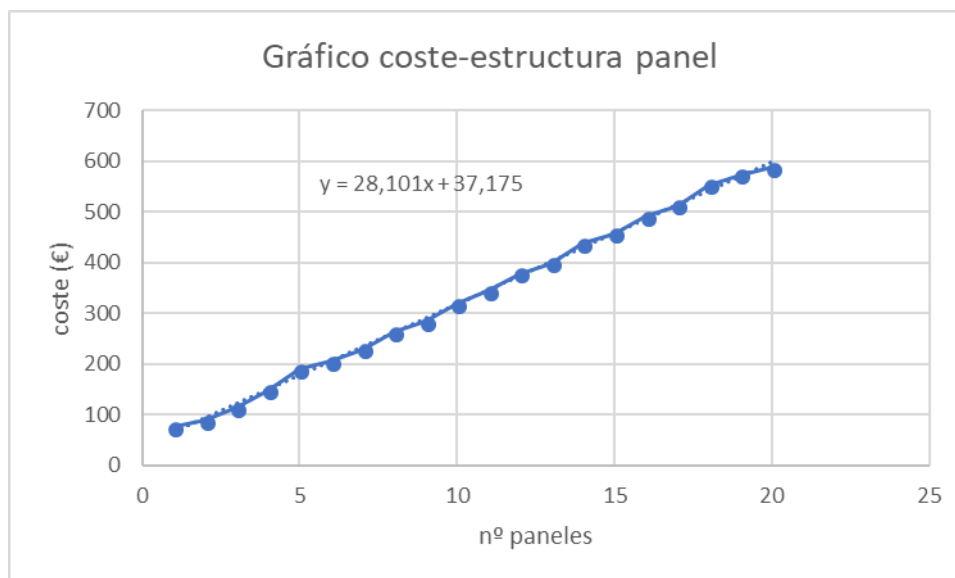


Figura 19. Gráfico del coste de la estructura en función del nº de unidades

La expresión del coste de la estructura en función del número de unidades (número de paneles [N]) es, pues:

$$C_{estructura} = 37 + 28 \cdot N \quad [€]$$

Ecuación 17. Coste inversión estructura en función del nº unidades

Para obtener la expresión en función de la potencia fotovoltaica basta con sustituir $N = \frac{P_{total}}{0,25}$

$$C_{estructura} = 37 + 112 \cdot P_{total} \quad [€]$$

Ecuación 18. Coste inversión estructura en función de la potencia instalada

5.2.2.3. Inversor

Como se ha comentado con anterioridad, los dos aspectos que determinan el inversor adecuado para una instalación son: la potencia del generador fotovoltaico y la conexión que se ha utilizado para los paneles. Si hablamos en términos económicos, que es lo que nos interesa, es la potencia del generador el aspecto que más influye con diferencia a la hora de determinar el precio del inversor. Por ese motivo, se ha podido construir una expresión que dependa únicamente de la potencia del generador (P_{total}).

De entre los inversores que hay en el mercado, hemos acotado la búsqueda a inversores específicos para conexión a red y, en concreto, monofásicos. Dado que, aun así, la oferta de inversores en el mercado era muy variada (distintas marcas y cada marca con distintos modelos y distintos precios) se ha tratado de buscar una marca y modelos en concreto que nos permitiesen construir con más precisión esta expresión matemática. Así pues, se ha escogido la marca Fronius y concretamente los modelos Galvo (para inversores de hasta 3kW) y Primo (para inversores de más de 3kW) ya que poseen unas buenas prestaciones y un precio medio del mercado. Por otro lado, tienen 5 años de garantía y unos 14 años de esperanza de vida.

Primero se ha construido la expresión en función de la potencia del mismo inversor [kW]:

$$C_{inversor} = 949 + 133 \cdot P_{inversor} \quad [€]$$

Ecuación 19. Coste inversión inversor en función de la potencia del propio inversor

Después se ha pasado de $P_{inversor}$ a P_{total} sabiendo, como se ha comentado en los apartados anteriores, que la potencia del inversor debe ser de alrededor al 85% de la del generador.

$$P_{inversor} = 0,85 \cdot P_{total} \quad [kW]$$

$$C_{inversor} = 949 + 133 \cdot 0,85 \cdot P_{total} \quad [€]$$

$$C_{inversor} = 949 + 113 \cdot P_{total} \quad [€]$$

Ecuación 20. Coste inversión inversor en función de la potencia instalada

5.2.2.4. Contador de generación

Será necesario utilizar un contador que cumpla con lo especificado en el RD de autoconsumo 900/2015 y debe estar homologado por la compañía distribuidora.

El contador será el mismo independientemente del dimensionado de la instalación. De entre los contadores de generación que hay en el mercado se ha escogido uno con un precio medio de 175€ (5 años de garantía y más de 25 años de esperanza de vida).

$$C_{\text{contador}} = 175\text{€}$$



Figura 20. Contador de generación seleccionado

5.2.2.5. Instalación

Los costes de instalación suelen variar ya que no solo dependen de la potencia fotovoltaica a instalar (P_{total}) sino también de la dificultad de colocación de los paneles principalmente.

En primer lugar, se ha supuesto que los paneles irán colocados sobre el tejado de la casa (para seguir el criterio que se ha establecido con las estructuras de los paneles) y que no será necesaria una grúa para colocarlos (dificultad media). Una vez hechas las suposiciones necesarias, se ha buscado un coste estándar consultando con varias empresas instaladoras de Barcelona sabiendo que el lugar de instalación será en la ciudad de Barcelona.

La expresión obtenida en función de la potencia ha sido:

$$C_{\text{instalación}} = 600 + 66 \cdot P_{\text{total}} \quad [\text{€}]$$

Ecuación 21. Coste instalación en función de la potencia instalada

Como se puede apreciar, el coste fijo es muy elevado y esto hace que el coste de instalación no dependa tanto de la potencia instalada sino de los recursos empleados (n° de trabajadores, material, transporte, etc). Además, cabe remarcar que este coste de instalación incluye tanto el coste de cableado y protecciones como cualquier otro tipo de material eléctrico necesario para la instalación.

5.2.3. Coste de mantenimiento

Existen dos tipos de mantenimiento para cualquier tipo de instalación: el mantenimiento preventivo y el mantenimiento correctivo.

- Mantenimiento preventivo: son las operaciones de inspección visual y verificación de actuaciones que aplicadas a la instalación deben permitir mantener dentro de límites aceptables las condiciones de funcionamiento, prestaciones, protección y durabilidad de la misma.
- Mantenimiento correctivo: son todas las operaciones de sustitución necesarias para asegurar que el sistema funcione correctamente durante su vida útil.

En cuanto al mantenimiento correctivo, ya se ha comentado que la vida útil tanto de las placas como de la estructura de soporte y del contador es superior a 25 años. En cuanto al inversor, sí que será necesaria su sustitución y se realizará a mitad de período (año 13):

$$C_{sustitución} = C_{inversor} = 949 + 113 \cdot P_{total} \quad [€]$$

Ecuación 22. Coste sustitución inversor en función de la potencia instalada

En cuanto al mantenimiento preventivo, al ser una instalación pequeña no es obligatoria su inspección anual por parte de un personal técnico cualificado. El mantenimiento que sí se debería hacer y que no implica coste alguno ya que lo puede realizar el mismo propietario de la vivienda es la limpieza de las placas. Es decir, las placas deben estar libres de suciedad, polvo, excrementos de aves o cualquier otro elemento que se pueda estacionar sobre ellas ya que puede afectar a su correcta producción y a su rendimiento. La propia lluvia elimina esta suciedad, pero en caso de prolongado tiempo sin precipitaciones el usuario deberá limpiar las placas. Para hacerlo, se debe utilizar agua sin ningún tipo de disolvente ni detergente y un trapo suave en caso que sea necesario.

Así pues, aunque el mantenimiento previsto tanto preventivo como correctivo sea nulo exceptuando el cambio de inversor, se va a considerar un 0,5% de la inversión inicial en material por posibles imprevistos en el correcto funcionamiento de la instalación y por si se quiere realizar inspecciones periódicas por personal cualificado. Este coste de mantenimiento evolucionará en función del deterioro de los equipos con una tasa del 4% anual.

$$C_{mantenimiento}^t = T_m \cdot I_{material} \cdot (T_d)^{t-1} \quad [€]$$

Ecuación 23. Coste de mantenimiento anual

Siendo:

$C_{mantenimiento}^t$ = coste de mantenimiento en el año t [€]

T_m = tasa de mantenimiento = 0,005

$I_{material}$ = coste de la inversión inicial en material [€]

T_d = tasa de deterioro de los equipos = 1,04

5.2.4. Otros costes o ingresos a considerar

- **Subvenciones:** no se considerarán subvenciones
- **Costes y pagos asociados al RD** de autoconsumo de 900/2015:

- **Coste fijo:** esta instalación está exenta de este pago ya que se trata de una instalación Tipo 1 de menos de 10kW de potencia contratada y sin sistema de acumulación (baterías).
- **Coste variable:** esta instalación está exenta también de este pago ya que se trata de una instalación Tipo 1 de menos de 10kW.
- **Pago de estudios de acceso y conexión a red:** nuestra instalación no cuenta con inyección 0 así que la energía sobrante la verteremos a la red. Según normativa, las distribuidoras pueden cobrar un pago llamado pago de estudios de acceso por verter la energía a la red, aunque no lo están haciendo. De este modo, este pago no se considerará. Lo que sí están cobran las distribuidoras es un coste por realizar una visita de verificación a la instalación antes de ponerse en marcha para asegurar que todo está bien instalado.
- **Coste visita de verificación:** la realiza la compañía distribuidora y tiene un coste aproximado de 120€.

5.2.5. Descripción del funcionamiento del programa de simulación de rentabilidad

A continuación, se explica el funcionamiento de la segunda parte del programa “Simulación de la rentabilidad de una instalación fotovoltaica”. Primero, se va a proceder a mostrar una imagen donde se puede observar su estructura:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2		Ptotal (kW)	2	TE	0,117412	Tr	0,995	Td	1,04					
3				IE	1,0511	T€/kWh	1							
4				IVA	1,21	Tm	0,005							
5														
6		Coste de inversión				Coste de mantenimiento								
7		t	€			t	1	2	3	4	5	6	7	8
8		0	Placas	2000		€	18,055	18,7772	19,528288	20,30942	21,121796	21,966668	22,845335	23,759
9		0	Estructura	261										
10		0	Inversor	1175										
11		0	Contador	175										
12		0	Instalación	732										
13		0	Visita	120										
14														
15		Coste de sustitución												
16		t	€											
17		13	Inversor	1175										
18														
19		Cashflow												
20		t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
21		Ingresos		298,04884	296,55859	295,0758	293,60042	292,13242	290,67176	289,2184	287,7723	286,33344	284,90178	283,47
22		Conversión	4463											
23		Csustitución												
24		Cmantenimiento		18,055	18,7772	19,528288	20,30942	21,121796	21,966668	22,845335	23,759148	24,709514	25,697895	26,725
25		Flujo neto	-4463	279,99384	277,78139	275,54751	273,291	271,01062	268,70509	266,37306	264,01316	261,62393	259,20388	256,75
26		Flujo neto acumulado	-4463	-4183,006	-3905,225	-3629,677	-3356,386	-3085,376	-2816,671	-2550,297	-2286,284	-2024,66	-1765,457	-1508,
27														
28		TIR		-0,067014										

Figura 21. Programa de simulación (parte 2). Simulación de la rentabilidad de una instalación fotovoltaica

Este programa funciona de la siguiente manera:

1. Se introducen los valores de Ptotal, TE (término de energía), IE (impuesto de electricidad), IVA, Tr (tasa de reducción del rendimiento), T€/kWh (tasa de crecimiento anual), Tm (tasa de mantenimiento) y Td (tasa de deterioro de los equipos).

4. Finalmente, el programa nos calcula la Tasa Interna de Rentabilidad (TIR).

Esta tasa es un parámetro habitual empleado en la valoración de inversiones. Nos proporciona una medida relativa de la rentabilidad por lo que nos será de gran ayuda no solo para medir la rentabilidad de un dimensionado en concreto sino para poder comparar cada uno de los dimensionados y ver cuál es el más rentable.

25	Flujo neto	-4463	279,99384	277,78139	275,54751	273,291
26	Flujo neto acumulado	-4463	-4183,006	-3905,225	-3629,677	-3356,38
27						
28	TIR	-0,067014				
29						

Figura 21.4. Paso 4 Programa de simulación (parte 2).

La TIR es la tasa de descuento que iguala, en el momento inicial, la corriente futura de cobros con la de pagos, generando un VAN igual a cero y se calcula de la siguiente forma:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} - I_0 = 0$$

Ecuación 24. Fórmula para el cálculo de la TIR

Siendo:

F_t = los flujos de dinero en cada periodo t

I_0 = la inversión realiza en el momento inicial ($t = 0$)

n = número de periodos = 25

Para obtener nuevamente estos resultados de rentabilidad para un nuevo dimensionado, basta con modificar la P_{total} y los datos se actualizarán automáticamente. Si se quieren realizar los cálculos para una tasa $T_{€/kWh}$ distinta, basta con sustituirla también por el nuevo valor.

6. Análisis de rentabilidad

A continuación, se exponen los resultados de rentabilidad para cada uno de los 6 perfiles de consumo considerados. El primer caso, el caso A, se explicará con mayor detalle. Finalmente se hará una comparación de los resultados de cada perfil y se extraerán las conclusiones.

	Consumo anual (kWh)	Potencia contratada (kW)
Caso A	7699	9,2
Caso B	7295	9,2
Caso C	5455	8,05
Caso D	5577	6,9
Caso E	3232	5,75
Caso F	3189	5,75

Tabla 3. Perfiles de consumo a estudiar

Como vemos, los 6 perfiles se pueden dividir en 3 niveles en función de la cantidad de consumo anual (Casos A y B, Casos C y D, Casos E y F). Esto nos será útil, como veremos más adelante, para realizar la posterior comparación y sacar conclusiones.

6.1. Caso A

Este perfil de consumo se ha obtenido de la colección de perfiles elaborada por el Instituto Politécnico do Porto que se encuentra publicada en la base de datos de la sociedad estadounidense IEEE Power & Energy Society. Este perfil es de una vivienda de Portugal (los hábitos de vida de los habitantes de Portugal son muy parecidos a los de los españoles). Su consumo es el más elevado de los 6 perfiles considerados.

Las características del perfil son:

- Potencia contratada 9,2kW
- Consumo total anual: 7699,4 kWh
- Consumo por horas

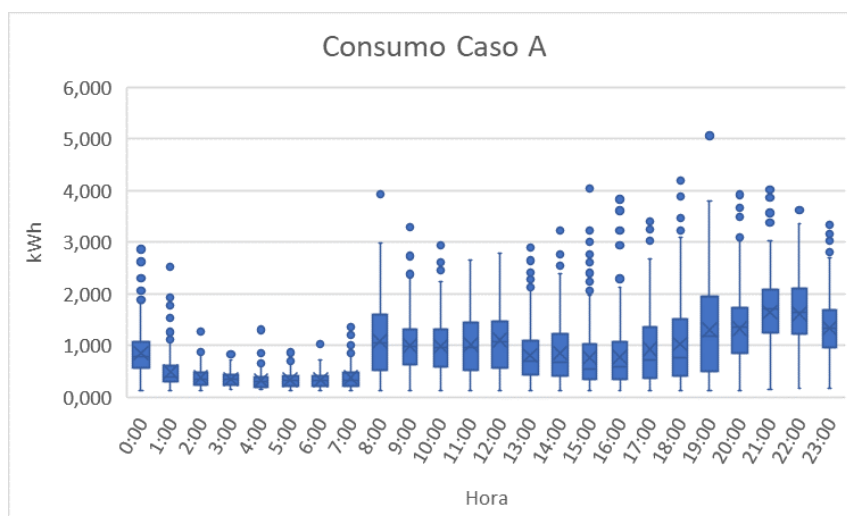


Figura 22. Consumo por horas Caso A

6.1.1. Balance energético

Antes de realizar el estudio de rentabilidad se ha querido realizar un estudio energético para comprobar cuál sería el mejor dimensionado para este perfil de consumo (Caso A) desde el punto de vista energético.

Para ello, se ha hecho uso tan solo de la primera parte del programa en el que nos ha calculado el balance energético anual para cada uno de los 92 dimensionados (9,2kW): energía suministrada por las placas (Esp), energía suministrada por la red (Esr) y energía vertida a la red (Ev). Recordemos que para cada perfil se considerarán todos los dimensionados posibles desde 0kW hasta una potencia igual a la potencia contratada de la vivienda con intervalos de 0,1kW.

Los resultados se encuentran representados en el siguiente gráfico:

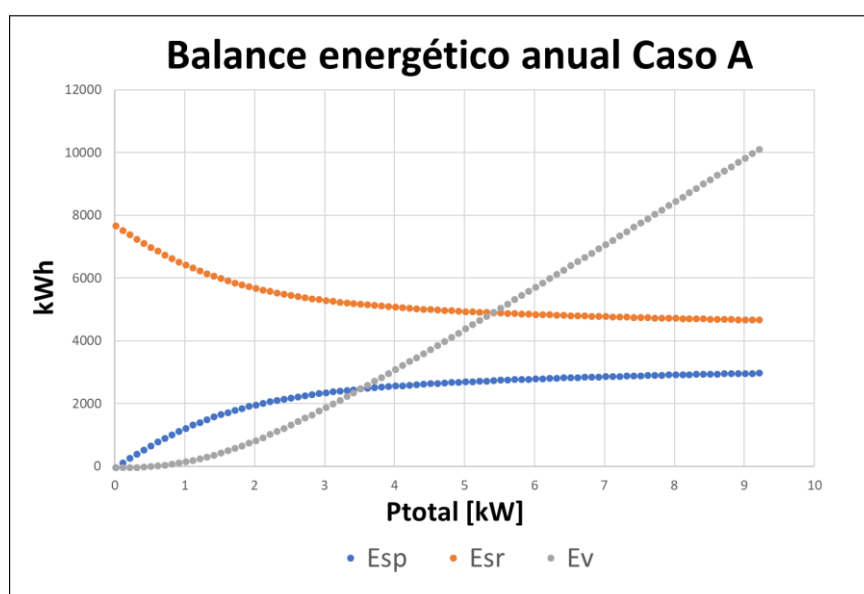


Figura 23. Balance energético anual Caso A

Si nos fijamos en el gráfico, vemos que la energía consumida por las placas Esp crece de manera significativa hasta los 3kW de Ptotal donde su crecimiento baja y se estabiliza. Si nos fijamos ahora en la energía vertida Ev, vemos que su comportamiento es el opuesto. Al principio tiene un bajo crecimiento y este va aumentando cada vez un poco más hasta llegar a los 3kW de Ptotal donde alcanza su crecimiento máximo siendo prácticamente constante hasta los 9,2kW de Ptotal final. Por otro lado, se puede apreciar también que, en el punto de 3,5kW de Ptotal la energía suministrada por las placas coincide con la energía perdida vertida a la red.

Dicho esto, se podría concluir que, desde el punto de vista energético, la mejor opción estaría entre los 2 y los 3kW de Ptotal ya que a partir de los 3kW la energía perdida crece de manera muy importante sin conseguirse un gran aumento de la Esp.

6.1.2. Estudio de rentabilidad

Con el uso del programa de simulación creado (tanto parte 1 como parte 2), se ha evaluado la rentabilidad para cada uno de los 92 dimensionados posibles para el Caso A, contemplando ambos escenarios ($T_{€/kWh}=1$, $T_{€/kWh} = 1,035964$) y se han obtenido unos resultados que se encuentran representados en el siguiente gráfico:

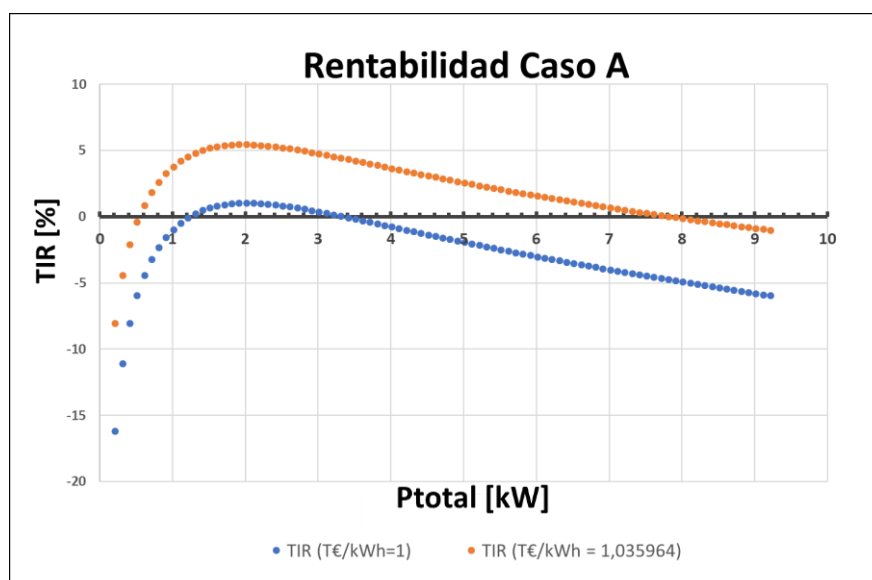


Figura 24. Estudio de rentabilidad Caso A

Se puede apreciar que el dimensionado más rentable (TIR más alta), tanto para el escenario de $T_{€/kWh}=1$ como para el de $T_{€/kWh} = 1,035964$, se encuentra alrededor de 2kW de potencia instalada:

Dimensionado más rentable	Ptotal	TIR
$T_{€/kWh}=1$	2kW	1,1082%
$T_{€/kWh} = 1,035964$	1,9kW	5,5191%

Tabla 4. Dimensionado más rentable para cada escenario Caso A

Ambos escenarios coinciden prácticamente con el dimensionado más rentable (2kW y 1,9kW). Como las placas son de 0,25kW, la opción más rentable para ambos escenarios sería la de 2kW de potencia instalada (8 paneles). A continuación, se muestra una tabla con el resultado final:

CASO A Ptotal = 2kW	TIR	Período de retorno	Flujo neto acumulado
$T_{€/kWh}=1$	1,1082%	22,15 años	631€
$T_{€/kWh} = 1,035964$	5,5190%	15,97 años	4589€

Tabla 5. Resultados del dimensionado más rentable Caso A

Una vez encontrado el dimensionado más rentable, queda comprobar si la instalación es realmente rentable o no. La tasa de rendimiento interno (TIR) suele ser siempre comparada

con una tasa mínima de corte k , que representa el costo de oportunidad de la inversión de manera que:

- Si $TIR < k$ entonces se rechazará el proyecto.
- Si $TIR > k$ entonces se aprobará el proyecto.

En este proyecto se ha considerado una tasa mínima de corte igual a cero. Considerar una tasa mínima de corte igual a cero implica, de hecho, que se aprobarán los proyectos que tengan beneficios al final de los 25 años de período (flujo neto acumulado positivo) y se rechazarán los proyectos que supongan pérdidas a final de los 25 años de período (flujo neto acumulado negativo). Se ha tomado esta decisión en base a dos motivos. En primer lugar, porque se ha considerado que una instalación de este tipo no se lleva a cabo con la intención de sacar una gran rentabilidad sino por otros motivos como los de promover la autosuficiencia, las energías libres y la reducción de la contaminación del medio ambiente entre otros. Y, en segundo lugar, porque es un proyecto de mínimo riesgo el cual ya se ha considerado de manera preventiva en la partida destinada al coste de mantenimiento. En caso que la familia que lleva a cabo este proyecto lo considere realmente como una inversión, se tendría que comparar la TIR con la rentabilidad media del mercado para proyectos con el mismo riesgo.

Dicho esto, vemos que para los dos escenarios planteados la TIR es superior a cero por lo que se puede decir que realizar una instalación fotovoltaica para este perfil de consumo (Caso A) sería rentable y que el dimensionado más óptimo sería el de 2kW de potencia instalada (8 paneles).

Si ahora nos fijamos en cuan rentable sería, aquí ya entramos en dudas. Como vemos, el nivel de rentabilidad se encuentra firmemente relacionado con el precio del kWh ya que para ambos escenarios la TIR, el período de retorno y los beneficios finales distan mucho entre sí. El precio del kWh, como hemos visto anteriormente, es muy variante y depende de muchos factores difíciles de predecir. Si volvemos a fijarnos en el precio del término de energía consumida de los últimos 4 años, pero esta vez en forma de gráfica vemos como el precio no solo es inestable de un año para otro sino también de un mes a otro:

Evolución del precio de la electricidad (PVPC)

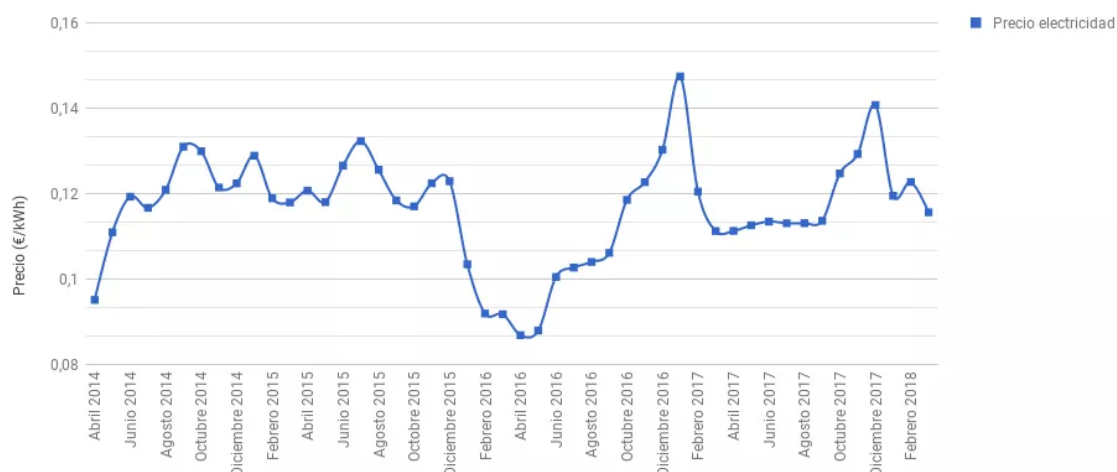


Figura 25. Gráfico del precio del término de energía del kWh en España (últimos 4 años)

Si nos fijamos ahora en el precio del kWh pero esta vez de los últimos 13 años veremos que del 2005 al 2012 el aumento ha sido muy significativo y que los últimos 4 años el precio se ha mantenido bastante estable con una tasa de crecimiento igual a la que hemos considerado en los cálculos $T€/kWh = 1,035964$ (estos datos están obtenidos de Eurostat y el precio, a diferencia del gráfico anterior, incluye ambos términos (energía consumida y energía contratada) más impuestos):

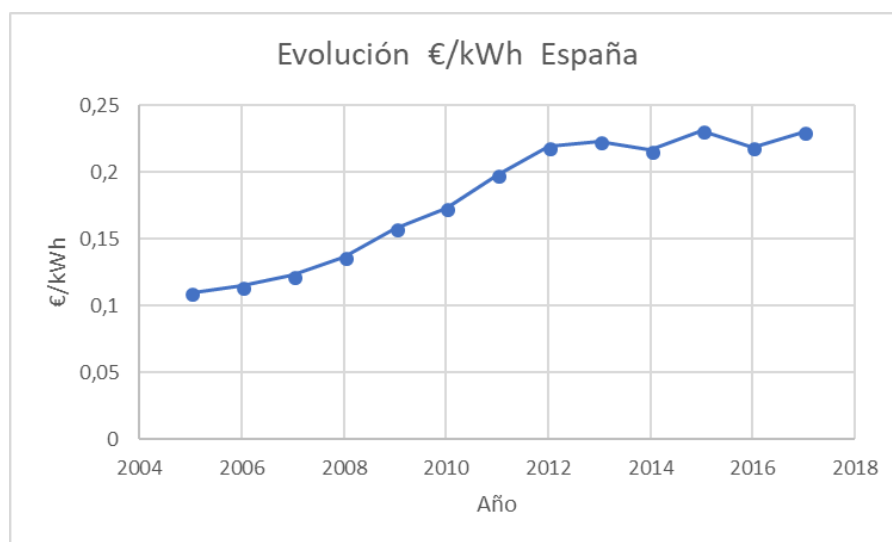


Figura 26. Gráfico del precio total del kWh en España (últimos 13 años)

Por lo tanto, es muy difícil poder afirmar con precisión a día de hoy que tipo de rentabilidad se obtendrá para esta instalación a 25 años vista. Pero vista la tendencia, si consideramos como peor de los casos que el precio de la luz se mantuviese constante, la instalación sería

igualmente rentable con una TIR a 25 años de 0,011082 y con unas ganancias finales de 631€.

6.1.3. Impacto medioambiental

Las instalaciones fotovoltaicas domésticas tienen un impacto medioambiental relativamente bajo en comparación a los sistemas de generación de energía convencionales como el carbón o el gas natural. Si analizamos los diferentes factores veremos que el impacto se limita solo a la fabricación, pero no al funcionamiento.

En cuanto al funcionamiento, los factores como el ruido, las emisiones gaseosas a la atmósfera, la destrucción de flora y fauna, los residuos tóxicos y peligrosos vertidos al sistema de saneamiento o incluso el uso del suelo (normalmente los paneles se instalan en los tejados o azoteas) se pueden considerar nulos.

En cuanto al proceso de fabricación, sí que existe un impacto. Durante el proceso de fabricación tanto de los paneles como del resto de componentes, se producen emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. Particularmente, en el caso de los paneles, también se requiere de una gran cantidad de energía para su fabricación y se usan numerosas sustancias peligrosas, muchas de las cuales se emplean para purificar y depurar la superficie semiconductora de los paneles como el ácido clorhídrico o el ácido sulfúrico entre otros.

En cualquier caso, el impacto ambiental de la energía solar fotovoltaica es mucho menor que el del resto de sistemas de generación convencionales, por lo que es claramente una alternativa más limpia y sostenible.

Si nos centramos en su impacto positivo, uno de los más importantes es que al producir energía mediante los paneles fotovoltaicos se reduce significativamente las emisiones de CO₂ emitidas en comparación a si se produce esa misma energía con los sistemas convencionales.

A continuación, a base de ejemplo, se va a realizar el cálculo sobre los kg de CO₂ que se evitarían emitir cada año por consumir energía de la instalación fotovoltaica de 2kW del Caso A:

Según el Informe de emisiones de gases de efecto invernadero llevado a cabo por el Centro Español de Metrología (CEM) en 2015 [7], por cada kWh que se consume de energía eléctrica en España, se liberan 0,29kg de CO₂ a la atmósfera. Los kWh anuales proporcionados por la instalación fotovoltaica de 2kW del Caso A son 1996 kWh. Si consideramos también los vertidos a la red (ya que estos se aprovecharán por otro usuario) la cifra asciende a 2857kWh. Si consideramos como nulas las emisiones de CO₂ emitidas por parte de la instalación fotovoltaica cuando se produce energía:

$$kg\ CO_2\ evitados\ cada\ año = 2857kWh \cdot 0,29 \frac{kg\ CO_2}{kWh} = 828,5\ kg\ CO_2/año$$

Para poder tener un orden de magnitud, se ha querido comparar esta cifra con los kg de CO₂ que podría absorber un árbol común en las ciudades como es, por ejemplo, la acacia. Según un estudio de la Universidad de Sevilla [8], una acacia absorbe de media unos 3kg de CO₂ al día. Si comparamos los 828,5kg de CO₂ evitados anualmente con los 3kg que puede absorber la acacia al día:

$$1 \text{ año: } 828,5 \text{ kgCO}_2 = 9 \text{ meses de vida de la acacia}$$

$$25 \text{ año: } 20712 \text{ kgCO}_2 = 18 \text{ años y 9 meses de vida de la acacia}$$

6.2. Caso B

Este perfil de consumo, al igual que los 4 siguientes que quedan por analizar, se ha obtenido de una vivienda real de Barcelona entrando en la página web de la compañía eléctrica. Las características del perfil son:

- Potencia contratada 9,2kW
- Consumo total anual: 7295 kWh
- Consumo por horas

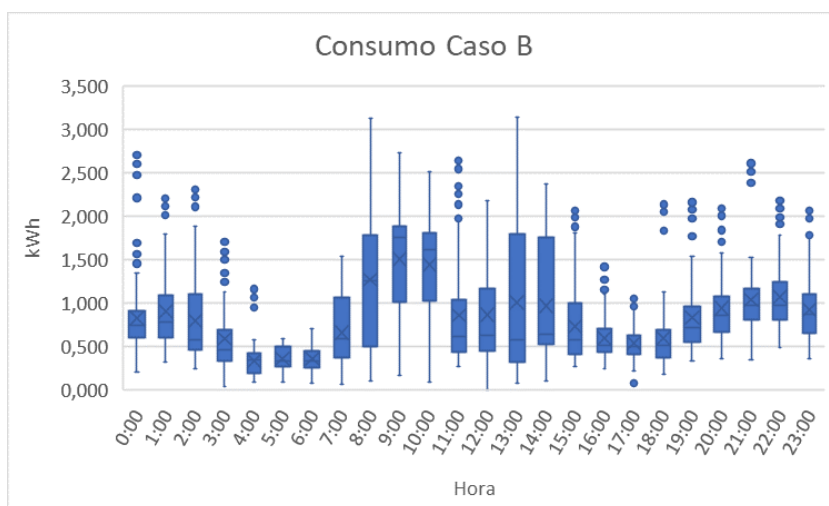


Figura 27. Consumo por horas Caso B

Este perfil tiene un consumo anual muy parecido al del Caso A. Ahora bien, si comparamos el consumo por horas de ambos, se puede ver cómo, en este Caso B, se produce un mayor consumo en las horas centrales del día (horas de sol). Esto seguramente provocará que se obtengan mejores resultados de rentabilidad, como comprobaremos seguidamente, ya que se podrá aprovechar en mayor medida la radiación solar.

Los resultados de rentabilidad para los 92 dimensionados son:

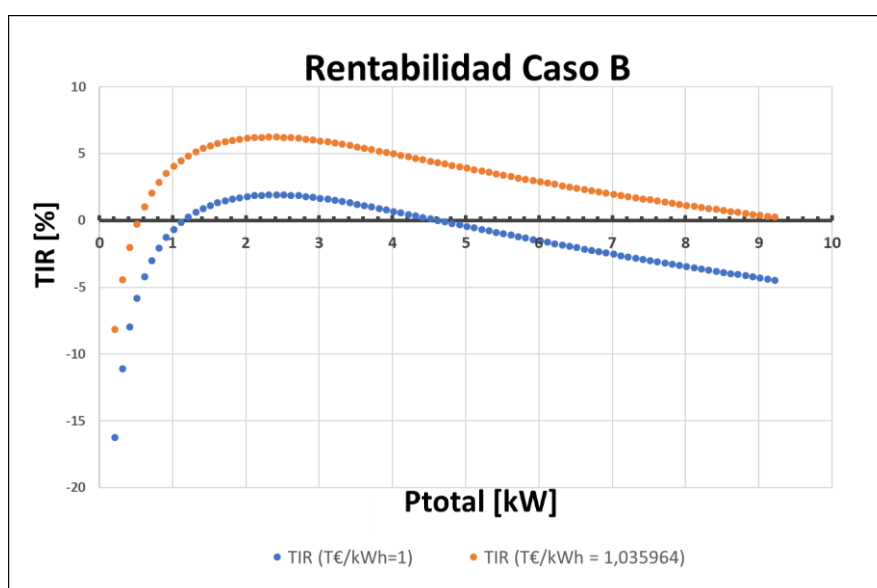


Figura 28. Estudio de rentabilidad Caso B

Dimensionado más rentable	Ptotal	TIR
$T_{€/kWh}=1$	2,5 kW	2,0018%
$T_{€/kWh} = 1,035964$	2,4 kW	6,3224%

Tabla 6. Dimensionado más rentable para cada escenario Caso B

Ambos escenarios vuelven prácticamente a coincidir con que dimensionado es el más rentable. Como las placas son de 0,25kW, la opción más rentable para ambos escenarios sería la de 2,5kW de potencia instalada (10 paneles).

CASO B Ptotal = 2,5kW	TIR	Período de retorno	Flujo neto acumulado
$T_{€/kWh}=1$	2,0018%	20,12 años	1343€
$T_{€/kWh} = 1,035964$	6,3074%	14,93 años	6171€

Tabla 7. Resultados del dimensionado más rentable Caso B

De nuevo, la diferencia de rentabilidad entre ambos escenarios es muy significativa. Esta vez, pero, se puede afirmar con mayor certeza respecto al Caso A, que realizar una instalación fotovoltaica para este perfil (Caso B) sería rentable siendo el dimensionado más óptimo el de 2,5kW (10 paneles).

6.3. Caso C

Las características de este perfil son:

- Potencia contratada 8,05kW
- Consumo total anual: 5455 kWh
- Consumo por horas

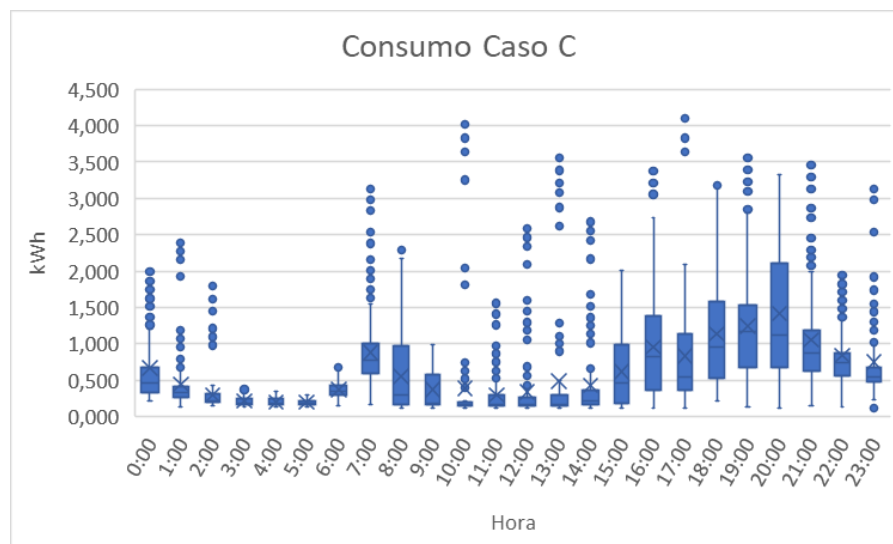


Figura 29. Consumo por horas Caso C

Este perfil tiene un consumo anual total más bajo que los otros dos anteriores y además se puede observar como en las horas centrales del día se produce un bajo consumo, por lo que se puede prever que los resultados de rentabilidad no serán tan buenos.

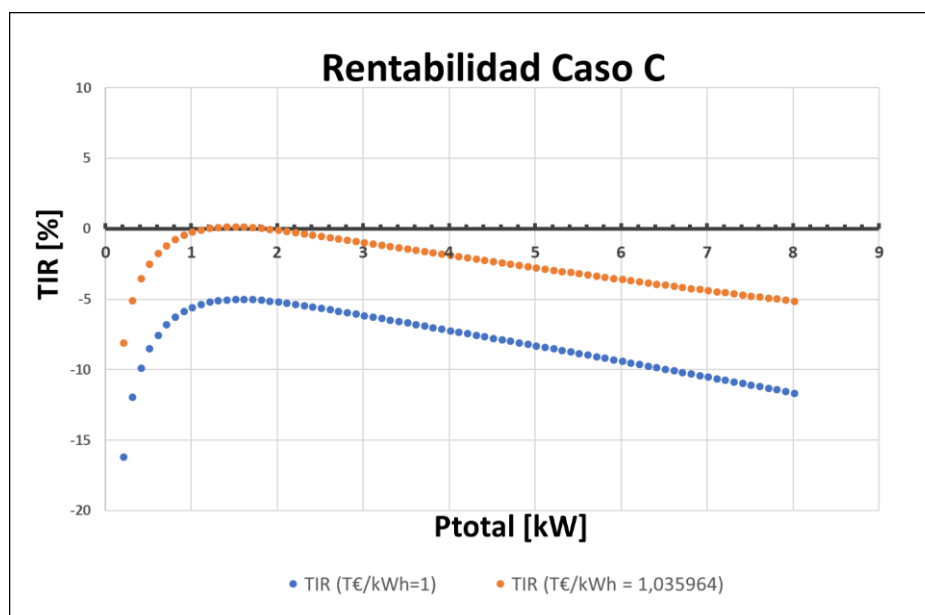


Figura 30. Estudio de rentabilidad Caso C

Dimensionado más rentable	Ptotal	TIR
$T_{€/kWh}=1$	1,6 kW	-4,9289%
$T_{€/kWh} = 1,035964$	1,5 kW	0,2128%

Tabla 8 Dimensionado más rentable para cada escenario Caso C

Ambos escenarios coinciden prácticamente de nuevo con el dimensionado más rentable. Al ser las placas de 0,25kW, la opción más rentable para ambos escenarios sería la de 1,5kW de potencia instalada (6 paneles).

CASO C Ptotal = 1,5kW	TIR	Período de retorno	Flujo neto acumulado
$T_{€/kWh}=1$	-4,9309%	-	-1926€
$T_{€/kWh} = 1,035964$	0,2128%	24,56 años	122€

Tabla 9. Resultados del dimensionado más rentable Caso C

En este caso vemos como para el escenario $T_{€/kWh}=1$ la instalación claramente no sería rentable. Sin embargo, para el escenario $T_{€/kWh} = 1,035964$ sí sería rentable, pero con una TIR y un flujo neto acumulado muy bajo y con un período de retorno que llega casi a los 25 años.

6.4. Caso D

Las características de este perfil son:

- Potencia contratada 6,9kW
- Consumo total anual: 5577 kWh
- Consumo por horas

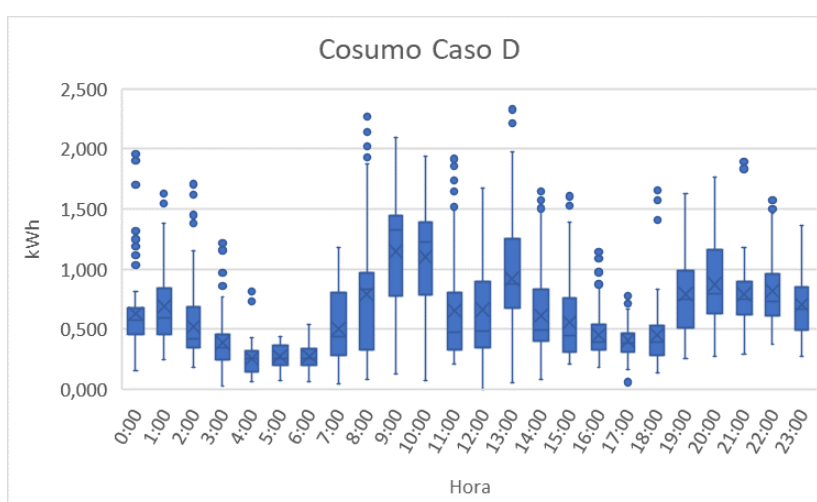


Figura 31. Consumo por horas Caso D

Este perfil tiene un consumo total anual muy parecido al caso anterior C. Ahora bien, en este se consume más energía en las horas centrales del día por lo que probablemente se obtengan unos mejores resultados de rentabilidad.

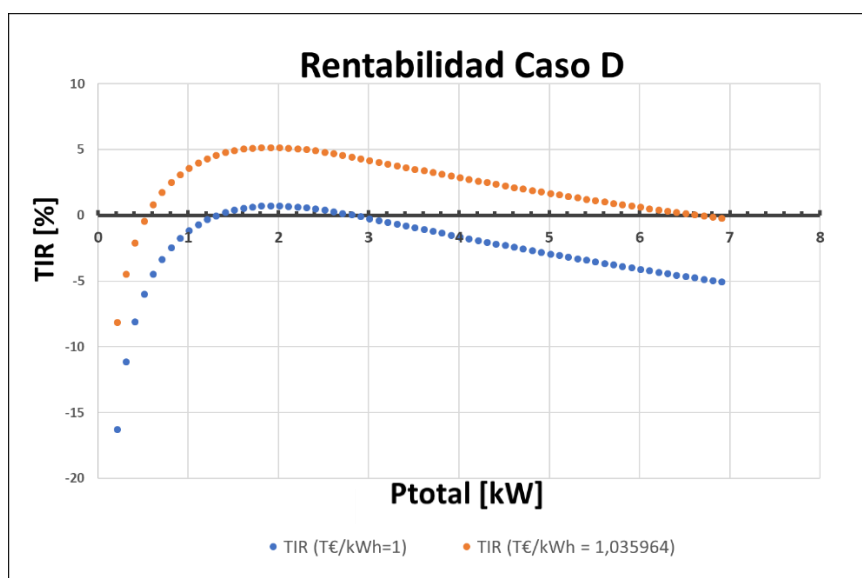


Figura 32. Estudio de rentabilidad Caso D

Dimensionado más rentable	P_{total}	TIR
$T€/kWh=1$	1,9kW	0,7982%
$T€/kWh = 1,035964$	1,9kW	5,2429%

Tabla 10. Dimensionado más rentable para cada escenario Caso D

La opción más rentable para ambos escenarios sería la de 2kW de potencia instalada (8 paneles).

CASO D $P_{total} = 2kW$	TIR	Período de retorno	Flujo neto acumulado
$T€/kWh=1$	0,7949%	22,90 años	448€
$T€/kWh = 1,035964$	5,2292%	16,33 años	4303€

Tabla 11. Resultados del dimensionado más rentable Caso D

En este caso vemos que para ambos escenarios la TIR es positiva por lo que se puede afirmar que realizar una instalación fotovoltaica para este perfil (Caso D) sería rentable siendo el dimensionado más óptimo el de 1,5kW (6 paneles).

6.5. Caso E

Las características de este perfil son:

- Potencia contratada 5,75kW
- Consumo total anual: 3232 kWh
- Consumo por horas

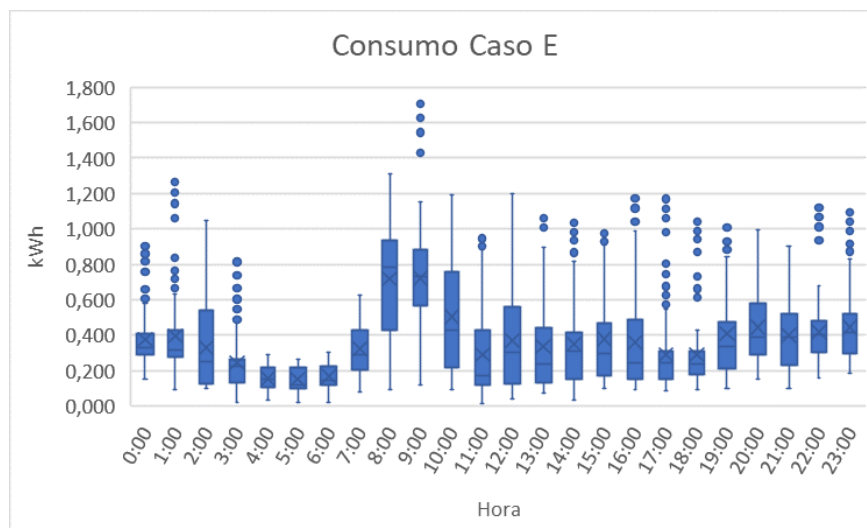


Figura 33. Consumo por horas Caso E

Este perfil tiene un consumo anual total más bajo que los 4 perfiles anteriores. Ahora bien, si nos fijamos en su consumo por horas, se puede apreciar que este es mayor en las horas centrales del día que en el resto de horas. Vayamos a ver su rentabilidad:

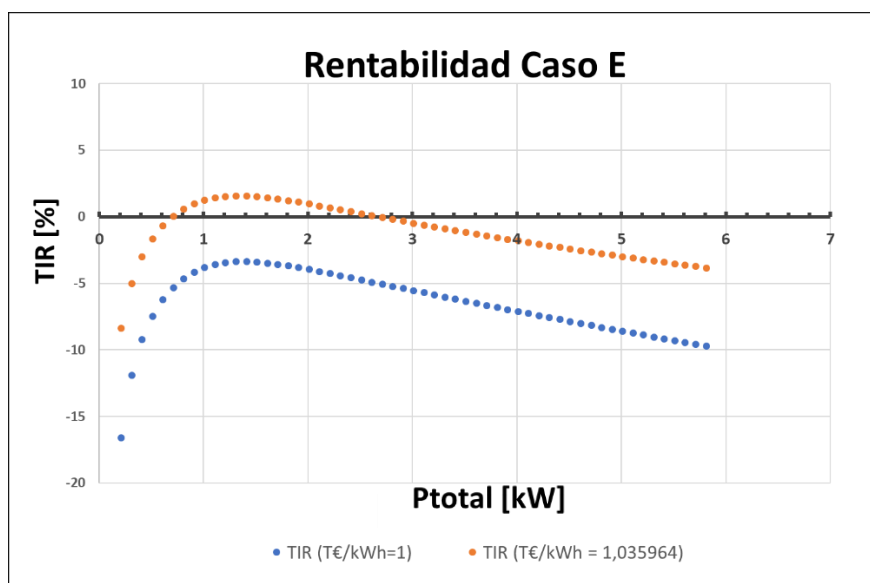


Figura 34. Estudio de rentabilidad Caso E

Dimensionado más rentable	Ptotal	TIR
$T_{€/kWh}=1$	1,3kW	-3,2935%
$T_{€/kWh} = 1,035964$	1,3kW	1,6522%

Tabla 12. Dimensionado más rentable para cada escenario Caso E

La opción más rentable para ambos escenarios sería la de 1,25kW de potencia instalada (5 paneles).

CASO E Ptotal = 1,25kW	TIR	Período de retorno	Flujo neto acumulado
$T_{€/kWh}=1$	-3,3174%	-	-1266€
$T_{€/kWh} = 1,035964$	1,6409%	21,89 años	921€

Tabla 13. Resultados del dimensionado más rentable Caso E

En este caso vemos como para el escenario $T_{€/kWh}=1$ la instalación no sería rentable. Sin embargo, para el escenario $T_{€/kWh} = 1,035964$ sí sería rentable, con una TIR que es incluso superior a la del caso C aun teniendo un consumo total anual un 41% por debajo.

6.6. Caso F

Las características de este perfil son:

- Potencia contratada 5,75kW
- Consumo total anual: 3189 kWh
- Consumo por horas

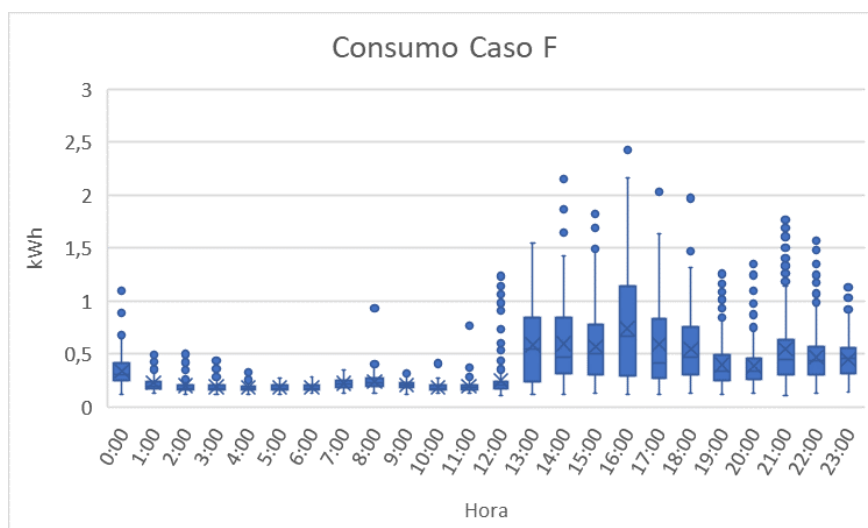


Figura 35. Consumo por horas Caso F

Su consumo, junto con el caso anterior E, es el más bajo de los perfiles considerados. Además, se puede observar como su consumo en las horas centrales del día es muy bajo.

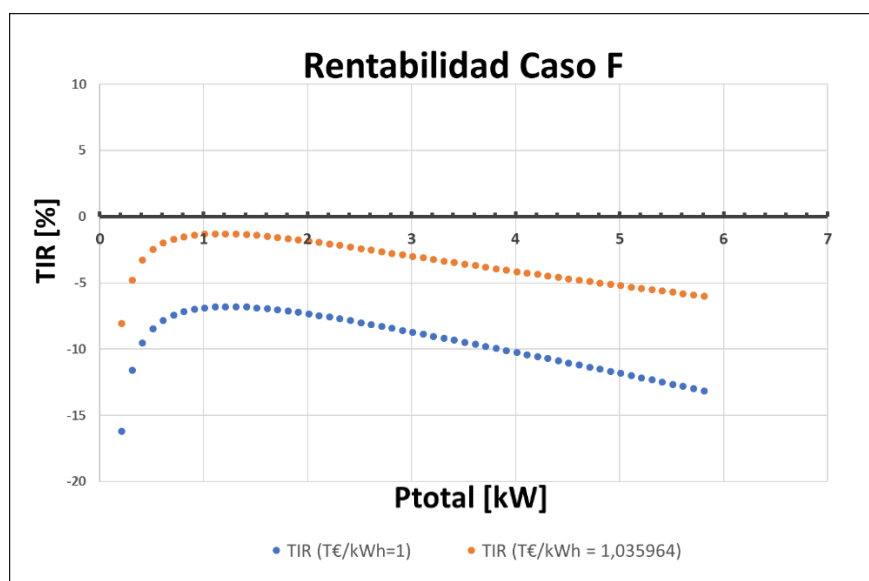


Figura 36. Estudio de rentabilidad Caso F

Dimensionado más rentable	Ptotal	TIR
T€/kWh=1	1,2kW	-6,7017%
T€/kWh = 1,035964	1,2kW	-1,1991%

Tabla 14. Dimensionado más rentable para cada escenario Caso F

La opción más rentable para ambos escenarios sería la de 1,25kW de potencia instalada (5 paneles).

CASO E Ptotal = 1,25kW	TIR	Período de retorno	Flujo neto acumulado
T€/kWh=1	-6,7014%	-	-2238€
T€/kWh = 1,035964	-1,2081%	-	-599€

Tabla 15. Resultados del dimensionado más rentable Caso F

En este caso vemos como el proyecto no sería rentable para ninguno de los dos escenarios.

6.7. Comparación entre casos

Para comparar los resultados obtenidos, se ha creado una tabla donde se especifican una serie de características sobre el dimensionado más rentable obtenido de cada perfil de consumo.

Algunos de los conceptos nuevos que se detallan en la tabla son:

Autoconsumo: es la capacidad de consumir aquello que uno mismo produce

$$\% \text{ autoconsumo} = \frac{\text{kWh producidos por las placas y consumidos por la vivienda}}{\text{kWh producidos por las placas}}$$

(recordemos que no todos los kWh que producimos se consumen en la vivienda, sino que hay parte que se vierte (pierde) a la red).

Autosuficiencia: es la capacidad de poder abastecer todo el consumo propio requerido mediante la producción propia.

$$\% \text{ autosuficiencia} = \frac{\text{kWh producidos por las placas y consumidos por la vivienda}}{\text{consumo total de la vivienda (kWh)}}$$

%kWh en horas de mayor radiación: en los apartados anteriores, se ha podido apreciar que uno de los posibles factores que puede influir sobre la rentabilidad de una instalación fotovoltaica es el horario de consumo de la vivienda. Por ese motivo, se ha encontrado interesante ver cuales son las horas del día donde incide mayor radiación solar sobre las placas y especificar qué porcentaje del consumo total de la vivienda se realiza durante esas horas del día.

Para comprobar cuales son las horas donde se produce mayor radiación solar se ha creado el siguiente gráfico a partir de los datos que tenemos de radiación solar:

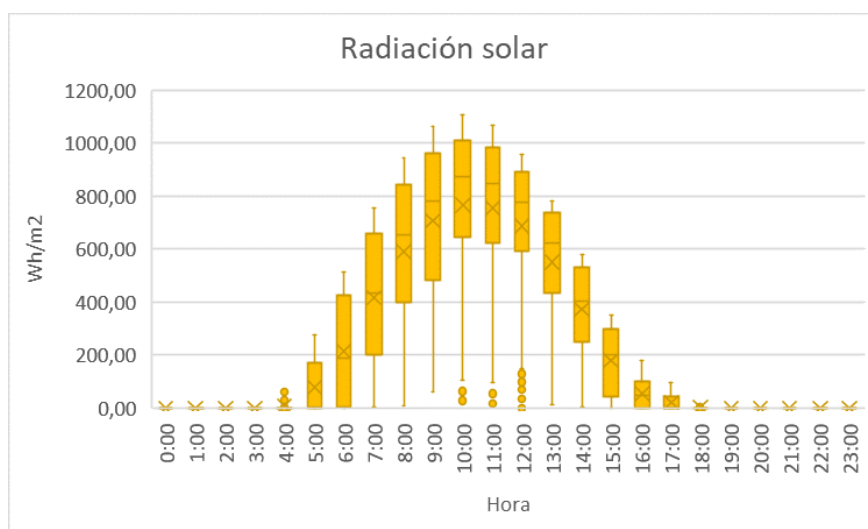


Figura 37. Gráfico radiación solar por horas

Como se puede apreciar, las horas del día donde se produce una mayor radiación son entre las 7:00h y las 14:00h con el 89,6% de la radiación total.

$$\% \text{ kWh en horas de mayor radiación} = \frac{\text{consumo entre las 7:00h y las 14:00h (kWh)}}{\text{consumo total de la vivienda (kWh)}}$$

Otras consideraciones de la tabla: la parte de la tabla que comprende las columnas desde TIR hasta “rentable” se ha dividido en dos: las celdas de arriba corresponden a la tasa de crecimiento $T€/kWh = 1$ y las de abajo a la de $T€/kWh = 1,035964$.

	Potencia instalada (Ptotal) [kW]	% autoconsumo	% autosuficiencia	%kWh en horas de mayor radiación	TIR [%]	Período de retorno [años]	Flujo neto acumulado [€]	Rentable
Caso A 7699kWh 9,2kW	2	70%	26% 1996kWh	34% 2647kWh	1,11	22,15	631	Sí
					5,52	15,97	4589	Sí
Caso B 7295kWh 9,2kW	2,5	69%	33% 2434kWh	43% 3127kWh	2,00	20,12	1343	Sí
					6,31	14,93	6171	Sí
Caso C 5455kWh 8,05kW	1,5	48%	19% 1033kWh	25% 1362kWh	-4,93	-	-1926	No
					0,21	24,56	122	Sí
Caso D 5577kWh 6,9kW	2	68%	35% 1944kWh	41% 2334kWh	0,79	22,90	448	Sí
					5,23	16,33	4303	Sí
Caso E 3232kWh 5,75kW	1,25	62%	34% 1103kWh	41% 1318kWh	-3,32	-	-1266	No
					1,64	21,89	921	Sí
Caso F 3189kWh 5,75kW	1,25	46%	26% 826kWh	28% 910kWh	-6,70	-	-2238	No
					-1,21	-	-599	No

Tabla 16. Resultados del dimensionado más rentable de cada perfil

Comparación entre casos con consumo total anual similar:

Caso A - Caso B: se puede apreciar una clara diferencia en cuál ha sido el dimensionado más rentable para cada uno de los perfiles. Para el perfil A ha sido el de 2kW mientras que para el B el de 2,5kW. El principal motivo que se ha encontrado ha sido que en el perfil B se consume más energía en las horas de mayor radiación (34% y 43% respectivamente). Al haber más consumo en esas horas nos permite colocar más paneles para aprovechar la radiación sin que el porcentaje de autoconsumo se reduzca.

Dado que los costes fijos de inversión de una instalación son muy importantes, la incorporación de dos paneles más a la instalación no implica un gran aumento del coste de inversión, pero si nos permite aumentar significativamente la generación de energía. De esta manera, si el % de autoconsumo se mantiene elevado, la rentabilidad de la instalación crece.

Caso C - Caso D: ocurre una situación similar a la de los perfiles A y B, pero esta vez aún más pronunciada. En el perfil C vemos que tanto el autoconsumo como la autosuficiencia son muy bajos y esto es debido principalmente a que el consumo a las horas de mayor radiación es tan solo del 25%. Esto repercute claramente en la rentabilidad de la instalación y hace que incluso con un consumo total anual de la vivienda elevado, el proyecto no salga rentable.

Caso E - Caso F: esta vez, aunque el % de autoconsumo y de autosuficiencia sea bastante mayor en el perfil E que en el F, el dimensionado más rentable es el mismo para ambos (1,25kWh). Y esto es debido principalmente al consumo total. Ya que aunque el porcentaje de consumo en las horas de mayor radiación para el perfil E sea elevado (41%) se trata tan solo de 1318kWh y este no es suficiente para que se puedan colocar más paneles y para que la instalación sea rentable (al menos para una tasa de T€/kWh = 1).

Resto de comparaciones:

Caso A - Caso D: aunque el consumo total anual del perfil A sea un 38% superior al de D, el dimensionado más rentable ha sido el mismo (2kW) y los resultados de rentabilidad han sido muy parecidos. Esto es debido a que el consumo de ambos en las horas de mayor radiación (no en porcentaje sino en cantidad) es muy similar (2647kWh y 2334kWh respectivamente).

Caso C - Caso E: ocurre una situación parecida a la de los perfiles A y D, pero esta vez aún más pronunciada ya que el perfil E, aun teniendo un consumo total anual 41% inferior al D, ha obtenido unos resultados de rentabilidad superiores.

Otros aspectos a considerar:

Ni el autoconsumo ni la autosuficiencia son directamente proporcionales a la rentabilidad, ya que un mayor porcentaje de ambos no implica una mayor rentabilidad (un ejemplo puede ser el perfil E, que tiene un alto porcentaje de autoconsumo y de autosuficiencia, pero una mala rentabilidad). Dicho esto, pero, está claro que una influencia significativa tiene ya que será muy difícil que se consiga una alta rentabilidad con un autoconsumo o eficiencia bajos y viceversa.

7. CONCLUSIONES

Uno de los objetivos principales del trabajo era determinar el dimensionado más rentable de una instalación fotovoltaica en función de los perfiles de consumo de la vivienda. Este objetivo se ha cumplido ya que se ha comprobado que no depende tanto del precio que pueda tener el kWh sino de otros factores como la radiación solar, el rendimiento de los equipos o incluso el mismo perfil de consumo que, a diferencia del precio del kWh, sí son conocidos.

Sin embargo, determinar con exactitud cuan rentable sería la instalación a largo plazo se hace mucho más complicado ya que el cálculo de la rentabilidad sí depende directamente del precio del kWh y este es difícil de predecir.

Otro de los objetivos principales del proyecto era la creación de un programa de simulación que automatizase los cálculos de rentabilidad. Este objetivo se ha cumplido y nos ha permitido agilizar estos cálculos y así poder abarcar el estudio de los 6 perfiles considerados.

Por otro lado, una de las conclusiones más importantes a las que se ha llegado en este proyecto es que la rentabilidad de una instalación fotovoltaica doméstica de autoconsumo no depende únicamente del consumo total anual de la vivienda sino precisamente de cuanta cantidad de ese consumo se realiza en las horas de mayor radiación solar.

Es evidente que sin un consumo total mínimo, una instalación fotovoltaica no puede llegar a ser rentable. Ahora bien, esto es tan solo una condición necesaria pero no suficiente ya que puede haber viviendas con un consumo total anual muy elevado en las que instalar una instalación fotovoltaica no salga rentable.

Por eso es muy importante conocer no solo el consumo detallado por horas sino también la radiación solar especificada por horas, para poder hacer coincidir en la medida de lo posible las horas de mayor consumo con las horas de mayor radiación.

Por otro lado, es muy importante saber también que la radiación no dependerá únicamente de la localización geográfica, sino también de la orientación y colocación de las placas. Ya que es perfectamente posible que las horas de mayor radiación para los paneles de una vivienda difieran significativamente a las horas de mayor radiación para los paneles de la vivienda del vecino de al lado.

En el caso de Barcelona y con la radiación solar media seleccionada, se ha llegado a la conclusión que para que una instalación fotovoltaica de autoconsumo salga rentable, se necesita un consumo en las horas de mayor radiación solar de la vivienda de alrededor de 2000kWh (si se considera el escenario de que el precio de la luz se mantiene constante) y de 1300kWh (si se considera que el precio de la luz crece con una tasa del 3,5964%).

También se ha llegado a la conclusión de que si la vivienda tiene un consumo total anual mínimo de alrededor de 5000kWh, aunque actualmente con el consumo por horas que se esté haciendo en la vivienda la instalación no salga rentable, es posible revertir la situación si se consigue un consumo en las horas de mayor radiación del alrededor del 40% (si se

considera el escenario de que el precio de la luz se mantiene constante) y del 25% (si se considera que el precio de la luz crece con una tasa del 3,5964%). También es posible conseguir que la instalación sea rentable con un consumo de 3000kWh si, en el caso de que el precio de la luz creciera con una tasa del 3,5964%, se consigue un consumo en las horas de mayor radiación del alrededor del 40%. En el caso de considerar el escenario de precio constante, conseguir que la instalación sea rentable se hace muy difícil ya que el porcentaje se situaría alrededor del 70%.

Por último, pero no por ello menos importante, es fundamental que el consumo sea uniforme o mejor aún, que tenga la misma curva que la radiación solar para que no se produzcan picos elevados de consumo que no puedan ser sufragados por la generación de energía de los paneles y así evitar verter energía a la red.

Referencias

Referencias bibliográficas

- [1] CENTRO DE ESTUDIOS DE LA ENERGÍA SOLAR (CENSOLAR) - PROGENSA. *‘Curso Programado. Instalaciones de Energía Solar’ Tomo II*. Sevilla: 1990.
- [2] PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (PVGIS) [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#HR, marzo 2018].
- [3] AGENCIA ESTATAL BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO (BOE) *Real Decreto de autoconsumo 900/2015*, [<https://boe.es/boe/dias/2015/10/10/pdfs/BOE-A-2015-10927.pdf>, marzo 2018].
- [4] FALK ANTONY, CHRISTIAN DÜRSCHNER, KARL-HEINZ REMMERS. *Fotovoltaica para profesionales : diseño, instalación y comercialización de plantas solares fotovoltaicas*. Sevilla: PROGENSA ; Berlin: Solarpraxis, 2006.
- [5] INSTITUT CATALÀ D'ENERGIA. *Energía solar fotovoltaica Número 4*. 2011 [http://icaen.gencat.cat/web/.content/10_ICAEN/17_publicacions_informes/04_coleccio_QuadernPractic/quadern_practic/arxius/04_energia_solar_fotovoltaica.pdf, abril 2018].
- [6] INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE). *Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red. Instalaciones de Energía Solar Fotovoltaica*. Madrid: 2011.
- [7] CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA (CEM) Informe de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en 2015 [<http://www.cem.es/sites/default/files/files/Huella%20de%20carbono%20en%20el%20CEM%202015.pdf>, mayo 2018].
- [8] UNIVERSIDAD DE SEVILLA, “Evaluación de la capacidad de sumidero de CO₂ de la vegetación arbórea y arbustiva.” [https://www.aopandalucia.es/inetfiles/agencia_estructura/2162016134737.pdf, mayo 2018].


Referencias complementarias

CENSOLAR. UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA (ESPAÑA) CENTRO DE ESTUDIOS DE LA ENERGÍA. *Curso de experto profesional en energía fotovoltaica*. Sevilla : PROGENSA, cop. 2009.

ENTE REGIONAL DE LA ENERGÍA DE CASTILLA Y LEÓN (EREN). *Energía solar fotovoltaica: manual del proyectista*. Valladolid 2004.

Anexo

A.1 Ejemplo de factura eléctrica completa



Endesa Energía XXI S.L.U.
Cif: B02040825
C/ Ribera del Loira 60. 28042 Madrid

DATOS DE LA FACTURA

IMPORTE FACTURA: 65,34 €
 N° factura: SMM801N0765003
 Referencia: 040002883719/0529
 Periodo de consumo: 15/02/2018 a 15/03/2018
 Fecha de cargo: 27 de marzo de 2018

PASAJE FORASTE 1 1-3
08022 BARCELONA
BARCELONA

FACTURA RESUMEN

Por potencia contratada	20,84 €
Por energía consumida	29,82 €
Impuesto electricidad	2,59 €
Alquiler equipos de medida y control	0,75 €
IVA NORMAL (21%)	11,34 €
TOTAL IMPORTE FACTURA	65,34 €

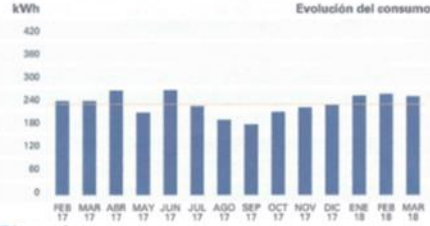
INFORMACIÓN DEL CONSUMO ELÉCTRICO

	Consumo en el periodo llano De 0h a 24h
Lectura anterior (real) (15-Febrero-2018)	5.311 kWh
Lectura actual (real) (15-Marzo-2018)	5.568 kWh
Consumo en el periodo	257 kWh

DATOS DEL CONTRATO

Fecha emisión factura: 20 de marzo de 2018
 Titular del contrato: [REDACTED]
 NIF: [REDACTED]
 Dirección de suministro: PASAJE FORASTE 1 1-3 BARCELONA, BARCELONA
 TIPO DE CONTRATO: PVPC sin discriminación horaria.
 TIPO DE CONTADOR: Con contador inteligente efectivamente integrado en el sistema de telegestión.
 Facturación por consumo real horario.

Evolución del consumo



■ Consumo Real
■ Media

Su consumo medio diario en el periodo facturado ha sido de 2,33 €
 Su consumo medio diario en los últimos 14 meses ha sido de 2,30 €
 Su consumo acumulado del último año ha sido de 3.079 kWh

DATOS DEL CONTRATO

Peaje de acceso: 2,00 €
 Número de contador: [REDACTED]
 Potencia contratada: 6,600 kW
 Referencia del contrato de suministro (EEXX): [REDACTED]
 Referencia del contrato de acceso (ENDESA DISTRIBUCION ELECTRICA): [REDACTED]
 Fecha fin de contrato: 20 de mayo de 2018 (renovación anual automática)
 Código unificado de punto de suministro (CUPS): ES003140543844014YK0F

Atención al cliente (EEXXI): 800760333 (gratuito) www.endesaclientes.com/tarifasreguladas
Averías y Urgencias (ENDESA DISTRIBUCION ELECTRICA): 800 76 07 06 (gratuito)
Reclamaciones (EEXXI): 800760333 (atencionalcliente@endesaonline.com)
Dirección postal reclamaciones(EEXXI): C/Ribera del Loira 60 28042 Madrid
 Si no está de acuerdo con nuestra respuesta a su reclamación, puede reclamar al organismo administrativo competente: INFÓRMESE EN EL 012 (Teléfono de Atención Ciudadana).

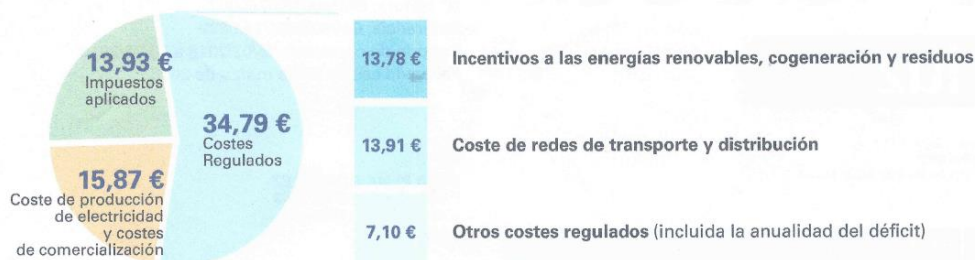
Forma de pago: Domiciliada
 Entidad: 3025 Sucurs [REDACTED]
 Cod.Mandato: E0007070107778S800030001
 Versión: 0001
 Su pago se justifica con el correspondiente apunte bancario

Endesa Energía XXI, S.L.U. Unipersonal. Inscrita en el Registro Mercantil de Madrid, Tomo 160.987, Libro 0, Folio 121, Sección 6ª, Hoja 272.003. Cif: B-02040825. Domicilio Social: C/Ribera del Loira, n° 60 28042 - Madrid.



DESTINO DEL IMPORTE DE LA FACTURA

El destino del importe de su factura, **65,34 euros**, es el siguiente:



A los importes indicados en el diagrama debe añadirse, en su caso, el importe del alquiler de los equipos de medida y control así como los conceptos no energéticos.



DETALLE DE LA FACTURA

Facturación por potencia contratada: Comprende dos conceptos: la facturación por peaje de acceso (resultado de multiplicar los kW contratados por el precio del término de potencia del peaje de acceso y el número de días del periodo de facturación) y la facturación por margen de comercialización fijo.

Importe por peaje de acceso:		
6,6 kW x 38,043426 Eur/kW y año x (28/365) días	19,26 €	
Importe del término fijo de los costes de comercialización:		
6,6 kW x 3,113 Eur/kW y año x (28/365) días	1,58 €	
		20,84 €

Facturación por energía consumida: Comprende dos conceptos: la facturación por peaje de acceso (resultado de multiplicar los kWh consumidos en el periodo de facturación por el precio del término de energía del peaje de acceso) y la facturación por coste de la energía (resultado de multiplicar los kWh consumidos por el precio del término del coste horario de energía del PVPC).

Importe por peaje de acceso:		
257 kWh x 0,044027 Eur/kWh	11,31 €	
Importe por coste de la energía (*):		
257 kWh x 0,072 Eur/kWh (**)	18,51 €	
		29,82 €
Subtotal		50,66 €

Impuesto de electricidad: Impuesto especial al tipo del 5,11269632% sobre el producto de la facturación de la electricidad suministrada

Impuesto electricidad (50,66 X 5,11269632 %) 2,59 €

Alquiler de equipos de medida y control. Precio establecido que se paga por el alquiler de equipos de medida y control.

Alquiler equipos de medida y control (28 días x 0,026785 Eur/día) 0,75 €

Subtotal otros conceptos 3,34 €

Importe total 54,00 €

IVA: Impuesto sobre el Valor Añadido al tipo del 21%
IVA NORMAL (21%) 21% s/ 54,00 11,34 €

TOTAL IMPORTE FACTURA 65,34 €

Precios de los términos del peaje de acceso publicados en Orden ETU 1282/2017

PVPC calculado según Real Decreto RD 216/2014

Margen de comercialización fijo publicado en RD 469/2016. Orden ETU 1948/2016

Precio del alquiler de los equipos de medida y control en Orden IET 1491/2013 de 3 de agosto

(*) Si desea más información sobre su consumo y el precio del kWh, puede consultarlo en nuestra página web

<https://www.endesaclientes.com/tarifasreguladas> y sobre su consumo en la página web de su Distribuidor

<https://zonaprivada.endesadistribucion.es>

(**) Incluye el término variable horario de los costes de comercialización según lo establecido en el RD 469/2016 y en la Orden ETU/1948/2016.

A2. Ficha técnica del panel fotovoltaico seleccionado: Panel Solar 250W Policristalino Atersa

Nueva gama Ultra con Tolerancia positiva +

Características eléctricas (STC: 1kW/m², 25°C±2°C y AM 1,5)*

	A-240P	A-245P	A-250P
Potencia Nominal (0/+5 W)	240 W	245 W	250 W
Eficiencia del módulo	14,74%	15,04%	15,35%
Corriente Punto de Máxima Potencia (Imp)	8,21 A	8,33 A	8,45 A
Tensión Punto de Máxima Potencia (Vmp)	29,21 V	29,37 V	29,53 V
Corriente en Cortocircuito (Isc)	8,73 A	8,82 A	8,91 A
Tensión de Circuito Abierto (Voc)	37,16 V	37,38 V	37,60 V

Parámetros térmicos

Coefficiente de Temperatura de Isc (α)	0,04% /°C
Coefficiente de Temperatura de Voc (β)	-0,32% /°C
Coefficiente de Temperatura de P (γ)	-0,43% /°C

Características físicas

Dimensiones (mm ± 2 mm)	1645x990x40
Peso (kg)	21,5
Área (m ²)	1,63
Tipo de célula	Policristalina 156x156 mm (6 pulgadas)
Células en serie	60 (6x10)
Cristal delantero	Cristal templado ultra claro de 4 mm
Marco	Aleación de aluminio pintado en poliéster
Caja de conexiones / Opcional	QUAD IP54 / QUAD IP65
Cables	Cable Solar 4 mm ² 1100 mm
Conectores	MC4 o combinable MC4

Rango de funcionamiento

Temperatura	-40°C a +85°C
Máxima Tensión del Sistema / Protección	1000 V / CLASS II
Carga Máxima Viento / Nieve	2400 Pa (130 km/h) / 5400 Pa (551 kg/m ²)
Máxima Corriente Inversa (IR)	15,1 A

*Especificaciones eléctricas medidas en STC. NOCT: 47±2°C.
Tolerancias medida STC: ±3% (Pmp); ±10% (Isc, Voc, Imp, Vmp).

Curvas modelo A-250P

CURVA I-V (a 25°C y 1kW/m²)

CURVA I-V (a 25°C)

CURVA I-V (a 1kW/m²)

Vista genérica de la construcción de un módulo fotovoltaico

- Módulos por caja: 25 uds
- Peso por palé: 580 kg
- En un contenedor de 40 pies entran 25 cajas: 625 paneles
- En un contenedor de 40 pies HC entran 26 cajas: 650 paneles
- En un contenedor de 20 pies entran 10 cajas: 250 paneles
- En un camión TAUTLINER entran 30 cajas: 750 paneles

Garantía Ultra de Atersa

NOTA: Los datos contenidos en esta documentación están sujetos a modificación sin previo aviso.

www.atersa.com • atersa@elecnor.com

Madrid 915 178 452 • Valencia 902 545 111 • Italia +39 039 226 24 82 • Alemania +49 151 153 988 44

Revisado: 28/01/13
Ref.: MU-6P (1) 6x10-R
© Atersa SL, 2012